

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita
Ostrava
Fakulta bezpečnostního inženýrství
Katedra požární ochrany**

**Posouzení dřevěné konstrukce na mimořádnou
návrhovou situaci
Assessment of the timber construction for an
extraordinary design situation**

Student: Bc. Michal Scheidl

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Mynarz

Studijní obor: Technika požární ochrany a bezpečnosti průmyslu

Termín odevzdání diplomové práce: 15.04.2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta bezpečnostního inženýrství
Katedra požární ochrany

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Scheidl**

Studijní program: N3908 Požární ochrana a průmyslová bezpečnost

Studijní obor: 3908T006 Technika požární ochrany a bezpečnosti průmyslu

Téma: **Posouzení dřevěné konstrukce na mimořádnou návrhovou situaci**
Assessment of the Timber Construction for an Extraordinary Design Situation

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Posouzení vybrané dřevěné konstrukce na účinky požáru.

Charakteristika práce:

Diplomová práce se bude zabývat popisem chování dřevěných konstrukcí za požáru. Dále se práce zaměří na požární odolnost stanovenou výpočtním postupem dle ČSN EN 1995-1-2. Bude provedena analýza přestupu tepla a rozložení teplot v dřevěné konstrukci za působení požáru. Získané hodnoty budou diskutovány v závěru práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

PURKISS, J. A.: Fire Safety Engineering Design of Structures. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1996
EN 1995-1-2 - Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru, Český normalizační institut, Praha, 2006
WALD, F. a kol.: Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí, ČVUT, Praha, 2005
BRADÁČOVÁ, I.: Požární bezpečnost domu, Era, Brno, 2005
KUPILÍK, V.: Stavební konstrukce z požárního hlediska, Grada Publishing, Praha, 2006

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Mynarz**

Datum zadání: 13.06.2014

Datum odevzdání: 15.04.2016




doc. Ing. Petr Kučera, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Poledňák, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě dne 15. dubna 2016

.....
Bc. Michal Scheidl

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů;
- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby 1);
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava (dále jen VŠB – TUO), dostupná k prezenčnímu nahlédnutí;
- beru na vědomí, že VŠB – TUO má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít v souladu s § 35 odst. 3 2);
- beru na vědomí, že podle § 60 3) odst. 1 autorského zákona má právo VŠB – TUO na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 3) odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého VŠB – TUO nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Bc. Michal Scheidl

Minkovice 45, Frýdlant 464 01

Dne: 15.04.2016

Podpis:.....

1) zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních

předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

2) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

3) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst.)

3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Miroslavu Mynarzovi, za ochotnou pomoc při zpracovávání práce, při tvorbě modelu a také za poskytnuté materiály a konzultace. Dále bych rád poděkoval firmě SVS FEM s.r.o. Brno, která mi umožnila modelování v programu ansys a mé rodině a přítelkyni za podporu ve studiu.

Anotace

Bc. SCHEIDL, M. *Posouzení dřevěné konstrukce na mimořádnou návrhovou situaci*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2016. 67 s.

Diplomová práce je zaměřena na chování hořlavého konstrukčního systému, konkrétně na odolnost dřevěných konstrukcí za zvýšené teploty a problémy s tím spojené. Práce se zabývá problematikou výstavby vícepodlažních budov z hlediska legislativy a dále problematikou spojenou s odstupovými vzdálenostmi u hořlavého konstrukčního systému. Experimentální část se zabývá analýzou přestupu tepla konstrukcí dřevostavby v rámci velkorozměrové zkoušky realizované v Rýmařově. Teplotní analýza je realizovaná s využitím programu Ansys, dle platných norem a výsledky byly porovnány se skutečnými naměřenými hodnotami.

Klíčová slova

dřevostavby, vícepodlažní budovy, požár, teplotní analýza, přestup tepla

Summary

Bc. SCHEIDL, M. *Assessment of the timber construction for an extraordinary design situation*. Diploma thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, 2016. 67 s.

This thesis focuses on possibility of using combustible construction system in multi-storey buildings, particularly problems connected with timber structures behaviour at high temperatures. The article discusses these problems in point of legislation regulations and standoff distances. In the experimental part I accuracy with the analysis of the heat transmission structures wooden structures of large-scale tests in city Rymarov using program Ansys, according to valid standards and the results were compared with the actual measured values .

Key words

Timber structure, multi-storey building, fire, thermal analysis, heat transfer

Obsah

1	ÚVOD	1
1.1	Motivace	1
1.2	Struktura	2
1.3	Cíl práce	2
2	REŠERŠE LITERATURY	3
3	VLASTNOSTI DŘEVA ZA BĚŽNÉ TEPLoty	5
3.1	Mechanické vlastnosti	5
3.2	Fyzikální a tepelné vlastnosti	7
3.3	Výhody dřevostaveb	8
3.4	Nevýhody dřevostaveb	10
3.5	Využití dřeva	11
4	VLASTNOSTI DŘEVA ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty	12
4.1	Chování za požáru	12
4.2	Výpočetní metody	13
4.2.1	Metoda účinného průřezu	13
4.2.2	Metoda redukované pevnosti a tuhosti	14
4.2.3	Obecná metoda	14
5	VYUŽITÍ DŘEVA NA VÍCEPDLAŽNÍ BUDOVY	15
5.1	Problém z hlediska požární bezpečnosti	16
5.2	Předpisy z hlediska požární odolnosti	17
5.3	Problém z hlediska legislativy	18
6	ODSTUPOVÉ VZDÁLENOSTI	21
6.1	Názvosloví	21
6.2	Požadavky na obvodové stěny	22
6.3	Příklad skladby obvodové stěny v závislosti na odstupové vzdálenosti	24
6.4	Problematika umístování dřevostaveb na pozemek	27
7	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
7.1	Požární zkouška v Rýmařově	28
7.1.1	Informace o objektu	28
7.1.2	Umístění termočlánků	30
7.1.3	Požární zatížení	34
7.1.4	Průběh požární zkoušky	35
7.1.5	Naměřené hodnoty	38
7.2	Analytické řešení	40

7.2.1	Parametrická teplotní křivka	40
7.2.2	Nominální teplotní křivky	43
7.2.3	Vstupní teploty	43
7.2.4	Výpočet přestupu tepla v konstrukci vypočteno dle	44
7.3	Numerické řešení	47
7.3.1	Postup modelování	47
7.4	Porovnání naměřených hodnot s výstupy z modelování a výpočtů dle analyt. řešení	52
8	Závěr	60
	Citovaná literatura.....	62
	Seznam obrázků	65
	Seznam tabulek	66
	Seznam grafů.....	66

1 ÚVOD

1.1 Motivace

Od začátku civilizace se lidé snad nejvíce ze všech pohrom báli ohně, proti kterému byli zcela bezmocní. Stačí si přečíst knihu „Quo vadis“, ve které spisovatel Henryk Sienkiewicz popisuje požár Říma. Tak někdy padla za oběť požáru celá města. Teprve s rozvojem techniky se objevuje i technika požární. Nejprve jen na ruční ovládání, dále však se její kvalita a úroveň rychle zvyšuje.

V současné době jsou k dispozici nejmodernější technické prostředky, pomocí kterých se hasiči snaží požáry likvidovat. Bohužel ani to kolikrát nestačí a objekt se náhle zmítá v plamenech a nakonec se promění v popel. Je to způsobeno tím, že u hašení požáru z hlediska zásahů hasičské jednotky hraje velkou roli čas. Konkrétně čas zpozorování požáru, čas ohlášení požáru, čas výjezdu požární jednotky, čas příjezdu hasičů na místo zásahu a čas zahájení útoku až po čas likvidace požáru. Je zde tedy několik situací, u kterých tak jako u většiny vzniků požárů hraje hlavní roli člověk.

Jednou z možností jak zamezit škodám způsobeným vlivem požáru je mu samozřejmě předejít, což nelze dost dobře provést. Ovšem lze omezit jeho šíření a tím vytvořit dostatek času pro zásah hasičské jednotky. Tato možnost se nazývá pasivní ochrana. Jednou z částí pasivní ochrany je dělení objektů do požárních úseků, které ohraničují požárně dělicí konstrukce s požární odolností. Různé možnosti požárních odolností stavebních konstrukcí nabízejí konstrukce složené z různých materiálů, které mají odlišné vlastnosti a jinou třídu reakce na oheň. Mezi materiály bývá u lidí a legislativou „outsiderem“ dřevo a materiály na bázi dřeva, a to ať už za běžné, tak za zvýšené teploty.

Mylná domněnka mnoha lidí bývá, že dřevo je materiál pouze pro provizorní konstrukce s nízkou trvanlivostí a nízkou odolností proti ohni, chladu a hluku. Ve skutečnosti je tomu jinak, dřevo je obnovitelná recyklovatelná surovina s dobrými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, s relativně vysokou požární odolností a s životností pro běžné stavby zcela dostačující. Dřevěné konstrukce se čím dál více dostávají do středu zájmu a na trhu jsou čím dál více žádané.

1.2 Struktura

1. ÚVOD
2. REŠERŠE LITERATURY
3. VLASTNOSTI DŘEVA ZA BĚŽNÉ TEPLoty
4. VLASTNOSTI DŘEVA ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty
5. VYUŽITÍ DŘEVA NA VÍCEPODLAŽNÍ BUDOVY
6. Odstupové vzdálenosti
7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST
8. ZÁVĚR

V diplomové práci píš zkráceně materiál dřevo, přičemž se jedná o dřevo a materiál na bázi dřeva. Této zkratky využívám z důvodu úspory místa a to jak v textu, tak v nadpisech.

1.3 Cíl práce

Cílem práce je shrnout nezkreslené informace o dřevě a dřevěných konstrukcích jak za běžné teploty, tak za zvýšené teploty. Dále popsat problémy spojené s legislativou, která omezuje využití dřevěných konstrukcí na vícepodlažní budovy a skutečný problém týkající se velkých odstupových vzdáleností včetně konkrétního příkladu. V experimentální části bude popsán průběh velkorozměrové požární zkoušky dřevostavby v Rýmařově. Bude aplikována parametrická a normová teplotní křivka na požár uvnitř dřevostavby a bude porovnána se skutečnými naměřenými teploty. Dále se práce zaměří na přesnost řešení přestupu tepla konstrukcí dřevostavby z velkorozměrové zkoušky pomocí programu Ansys, dle analytického řešení převzatého z literatury a s následným porovnáním se skutečnými naměřenými hodnoty.

2 REŠERŠE LITERATURY

Zvyšující se zájem trhu o dřevo a dřevěné konstrukce má za následek stále se rozvíjející studii jeho chování a to jak za běžné tak za zvýšené teploty. Mnoho bakalářských, diplomových i disertačních prací, vědeckých článků a spousta knih bylo věnováno tématu zabývajícimu se dřevěným konstrukcím. Velkým přínosem pro tento obor je Doc. Ing. Petr Kuklík, CSc., z jehož literatur je v této diplomové práci několikrát čerpáno.

Informace o vlastnostech dřeva za běžné teploty, výhodách a nevýhodách a o jeho využití byly čerpány z následujících prací, knih a normy: *Dřevěné konstrukce, skriptum 2005* [1], *Stavba dřeva* [2], *ČSN EN 1991-1-1- Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení* [3], *Klíč k fyzice aneb příběhy ze života* [4], *Výhody a nevýhody dřevostaveb* [5], *Wood – based composites and panel products* [8], *Dřevostavby a zeměřesení* [9],

Informace o vlastnostech a chování dřeva za zvýšené teploty byly čerpány ze skriptu: *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí* [6]. V této knize jsou srozumitelně popsány nejenom informace o dřevě a dřevěných konstrukcích, ale také přestup tepla, rozvoj teploty a posouzení na účinky požáru v betonových, ocelových, ocelobetonových a hliníkových konstrukcích postupujících dle norem. Pro specifikaci výpočetních metod bylo čerpáno z normy *ČSN-EN-1995-1-2 ED 5 – Navrhování dřevěných konstrukcí na účinky požáru* [7].

Využití dřeva na vícepodlažní budovy je popsáno na dřevo portálu *Požární bezpečnost vícepodlažních budov* [10]. Problémy z hlediska požární bezpečnosti vícepodlažních budov jsou stanoveny podle normy *ČSN 730802 – PBS – Nevýrobní objekty* [11] a dále jsou popsány z: *Požární bezpečnost staveb* [15], což je sylabus pro praktickou výuku určený především studentům ČVUT. V tomto sylabu je zjednodušeně uveden souhrn informací z norem zabývajících se požární bezpečnosti staveb. Souhrn předpisů z hlediska požární odolnosti vícepodlažních budov byl čerpán z prací: *Požární bezpečnost nízkopodlažních obytných budov ze dřeva* [16] a *Požární bezpečnost vícepodlažních budov na bázi dřeva* [17]. Informace k problémům vícepodlažních budov z hlediska legislativy byly čerpány především ze zahraniční práce *Fire safe timber buildings – a Nordic Wood project* [20], kde jsou vyčísleny povolené počty podlaží u dřevostaveb dle stavebních předpisů. Dále zde bylo čerpáno z českých zdrojů: *Moderní dřevostavba – její chování za požáru – evropské znalosti a předpisy* [18] a *Podpora pro navrhování vícepodlažních budov* [21].

Informace ke kapitole Odstupové vzdálenosti byly čerpány opět z normy *ČSN 730802 – PBS – Nevýrobní objekty* [11], kde jsou mimo jiné uvedeny informace, za jakých podmínek se může v požárně nebezpečném prostoru objektu nacházet jiný objekt nebo jiný požární úsek

téhož objektu. Dále při stanovení požadavků na obvodové stěny se čerpalo z normy ČSN 730810 – PBS – Společná ustanovení [22]. Konkrétní příklad, který řeší odstupové vzdálenosti od různých skladeb stěn, byl vypočítán dle funkce popisující odstupové vzdálenosti vlivem sálání tepla vytvořené v programu Microsoft Excel s názvem: *Výpočet odstupové vzdálenosti z hlediska sálání tepla* [24]. Tento program byl vytvořen v rámci projektu Fondu rozvoje vysokých škol publikovaný včetně sylabu určeného pro praktickou výuku (viz. výše).

Pro popis požární zkoušky v Rýmařově byla použita *Zpráva o výsledcích požární zkoušky dřevostavby v Rýmařově dne 24.4.2014* [26]. Pomocí technických zdrojů *Data z drátových termočlánků přenesené do měřicí ústředny ALMENO* [27] byly k dispozici reálné naměřené hodnoty teplot z požární zkoušky, které byly použity jako vstupní a dále jako kontrolní hodnoty výpočtů. Při výpočtu parametrické a normové teplotní křivky bylo postupováno dle normy ČSN – EN – 1991 – 1 – 2 – *Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru* [29]. Informace k výpočtům přestupu tepla byly čerpány ze zdrojů: *Metoda konečných prvků pro úlohu přenosu tepla* [30] a ze skript edice SPBI č. 22 *Dynamika požáru* [31]. K těmto výpočtům byla k této diplomové práci vytvořena funkce v programu Excele 2013, která vedla k zjednodušení a urychlení výpočtů. Na závěr jako nedílnou součástí pro tvorbu této diplomové práce byl pro modelování použit nelineární, multifyzikální program Ansys mechanical a s ním spjatý poslední zdroj v podobě *nápovědy programu Ansys* [34].

3 VLASTNOSTI DŘEVA ZA BĚŽNÉ TEPLoty

[35]

Dřevo je organický materiál rostlinného původu. Oproti ostatním materiálům je specifický v tom, že v různých směrech má různé vlastnosti (anizotropie), protože obsahuje tzv. vlákna. Tato vlákna, ve skutečnosti se jedná o 1 až 8 mm dlouhé buňky, jsou rostlá přibližně rovnoběžná. Výrazně se liší vlastnosti při namáhání dřeva ve směru rovnoběžném s vlákny oproti vlastnostem při namáhání dřeva kolmým k vláknům, které se dále ještě od sebe liší v tangenciálním a v radiálním směru. Nejlepší vlastnosti při namáhání dřeva jsou zaznamenány ve směru rovnoběžném s vlákny. [1]



Obrázek 1: Směry zkoušení vlastností dřeva [2]

3.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dřeva můžeme obecně shrnout jako schopnost dřeva odolávat účinkům vnějších sil. Mechanické vlastnosti se nejčastěji zjišťují statickými zkouškami na zkušebních vzorcích podle příslušné normy. Ovlivňuje je řada dalších vlastností dřeva: objemová hmotnost, vlhkost, konstrukční rozměr, rychlost zatěžování, doba trvání zatížení, vady. Existuje celá řada mechanických vlastností, níže jsou uvedeny nejdůležitější z nich. [1]

Pevnost v tahu

Pevnost v tahu u dřeva nabývá velkých rozdílů ve směru rovnoběžném s vlákny (podélném) a ve směru kolmém k vláknům (příčném). Zatímco v podélném směru má tahovou pevnost až 250 MPa, v příčném směru je tahová pevnost maximálně 10 MPa. Tato vysoká tahová pevnost v podélném směru nebývá dostatečně využívána z důvodu nižších pevností při jiném druhu zatěžování. Výhodného kompromisu lze docílit křížovým vrstvením. Z křížem

lepeného nebo laminovaného dřeva (v překladu z anglického výrazu Cross Laminated Timber neboli CLT) je například známý konstrukční systém NOVATOP.

[2]

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku v podélném směru je proti pevnosti v tahu asi 2,5x menší, zatímco tlaková pevnost v příčném směru je s pevností v tahu srovnatelná. Přestože je dřevo na tlak namáháno velmi často, jen zřídka kdy je překročena mez pevnosti v tlaku. Většinou tomu tak je pouze při jeho zpracování, zvláště při lepení a upínání.

[2]

Pevnost ve smyku

Proti ostatním pevnostem je největší smyková pevnost dřeva vykazována v příčném směru. Vlákná dřeva se totiž snadněji smykou po sobě než příčně. Příčné usmyknutí dřevěného prvku je téměř nemožné, protože dřevo je přitom namáháno na tlak příčně na vlákna a tato pevnost je proti smykové pevnosti napříč vláknům podstatně nižší. Na smyk jsou především namáhány konstrukční spoje.

[2]

Pevnost v ohybu

Ohybová pevnost materiálů se z konstrukčního hlediska považuje za nejdůležitější. Dřevo vykazuje ve směru vláken velmi vysokou pevnost v ohybu, ve směru příčném však velmi nízkou. Ohybová pevnost je na rozdíl od ostatních pevností ovlivňována i délkou namáhaného konstrukčního prvku. Na ohyb jsou namáhány vazníky, trámy a převážná část střešních konstrukcí.

[2]

Pevnost ve vzpěru

Vzpěrná pevnost je zvláštní případ tlakové pevnosti. Částečně zde spolupůsobí pevnost v ohybu, tudíž je také ovlivňována délkou namáhaného konstrukčního prvku v závislosti na způsobu uložení. Vyskytuje se u sloupů a u stojek.

[2]

Pružnost

Pružnost je vratná deformace. Při zatížení konstrukčního prvku dojde k deformaci, která se ale po odtížení vrátí do původního stavu. Modul pružnosti se mění v závislosti na druhu dřeva, vlhkosti, objemové hmotnosti, vadách dřeva a anizotropii. Průměrná hodnota modulu pružnosti pro dřevo v tahu a tlaku v podélném směru je 10 – 15 GPa, zatímco v příčném směru je tato hodnota až 25 krát menší.

[2]

3.2 Fyzikální a tepelné vlastnosti

Vlhkost

Jednou z hlavních fyzikálních vlastností dřeva je jeho vlhkost. Vlhkost je dána množstvím vody obsaženém ve dřevu, tj. poměrem hmotnosti vody k hmotnosti dřevní sušiny. Ztrácí-li dřevo vlhkost, sesychá (zmenšuje své rozměry). V případě, že dřevo navlhá, absorbuje do sebe vlhkost ze svého okolí a bobtná (zvětšuje své rozměry). Střídavému sesychání a bobtnání se říká pracování dřeva. Pokud se zvyšuje vlhkost dřeva do meze nasycení vláken (tj. do 30 %), zhoršují se jeho mechanické vlastnosti, především pevnost dřeva v tlaku. Vlhkost nad 30 % již nemá podstatný vliv na snížení mechanických vlastností, ani na rozměry prvku. K rychlému orientačnímu zjišťování vlhkosti dřeva používáme elektrické vlhkoměry, které využívají změny měrného odporu dřevní hmoty následkem změny její vlhkosti. K přesnému zjištění vlhkosti se používá váhová metoda. Hodnoty vlhkosti jsou závislé na druhu stromu, průběhu dne a na tom, zdali zjišťuji vlhkost v jádru či běle stromu. Např. u běle (světlejší obvodové části dřeva v kmeni stromu) smrku a dubu je průměrná vlhkost ráno 186% a 68%, v poledne 132% a 72%, a večer 105% a 66%. [1]

Objemová hmotnost

Objemová hmotnost představuje hodnotu dané veličiny vztažené k jednotkovému objemu. Objemová hmotnost dřeva je závislá na množství vody, kterou dřevo obsahuje. V normě [3] tab. A.3 jsou uvedeny hodnoty objemové hmotnosti dřeva pohybující se od 350 kg/m³ do 1080 kg/m³ v závislosti na různých pevnostních třídách. Dále platí, že čím větší je objemová hmotnost dřeva, tím se zvyšuje jeho tvrdost. [1]

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je schopnost dřevěné konstrukce vést teplo. Jelikož je dřevo pórovité a má relativně malou objemovou hmotnost, součinitel tepelné vodivosti tohoto materiálu je velmi malý, což je výhodou pro tepelnou akumulaci. Tepelná vodivost se pohybuje v rozmezí 0,04 – 0,35 W.m⁻¹.K⁻¹. [1]

Teplotní délková roztažnost

Teplotní délková roztažnost je schopnost dřevěné konstrukce při zahřátí či ochlazení na určitou teplotu měnit své délkové rozměry [4]. Teplotní roztažnost smrkového dřeva nabývá těchto hodnot: 5,4 x 10⁻⁶ m.K⁻¹ ve směru vláken a 34,1 x 10⁻⁶ m.K⁻¹ napříč vláken. Ve

srovnání s konvenčními materiály je teplotní roztažnost dřeva zanedbatelná, a tudíž se neuvažují účinky od teplotních změn a ani se neprovádí dilatační spáry. [1]

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita udává množství tepla, které je nutné na ohřátí jednotkové hmotnosti dřeva o 1°Celsia (1°K) [4]. Měrná tepelná kapacita je závislá na teplotě a vlhkosti dřeva. Její hodnota u suchého dřeva při 0°C je 1450 J.kg⁻¹.K⁻¹, což je v porovnání s ostatními materiály (ocel 469 J.kg⁻¹.K⁻¹, železobeton 1020 J.kg⁻¹.K⁻¹) poměrně vysoké číslo. Při porovnání těchto materiálů zjistíme, že dřevo přijme téměř trojnásobně větší množství tepla než ocel a o polovinu více než železobeton, čímž efektivněji ovlivňují tepelnou pohodu v interiéru a zejména u lehkých dřevostaveb hraje tato vlastnost významnou roli. [2]

3.3 Výhody dřevostaveb

O dřevostavbách panuje představa, že jde jen o provizorní konstrukce s nízkou trvanlivostí. Mnozí se mylně domnívají, že dřevo je materiál s nízkou odolností proti ohni, chladu a hluku. Ale ve skutečnosti je tomu zcela jinak.

Dřevo je obnovitelná surovina, a co se týká České republiky, bude tomu tak i nadále.

Tabulka 1: Umístění ČR v Evropě [1]

Lesnatost	12. místo
Zásoba dřeva / 1 ha	4. místo
Roční přírůstek / 1 ha	6. místo

Hodnoty, viz tabulka 1, nám poukazují na to, že lesy v ČR jsou na tom velice dobře a na rozkvětu, o čemž nám svědčí i běžný roční přírůstek dřeva, který se pohybuje okolo 18 mil. m³, zatímco těžba činí necelých 14. mil. m³. [1]

Z vlastností, které jsem uvedl dříve, je vidět, že dřevo má nízký poměr hmotnosti ke své únosnosti, což znamená malou spotřebu energie na výrobu nosného prvku, a rovněž tomu tak je i při dopravě a montáži.

Další příznivou mechanickou vlastností dřeva je nízká tepelná vodivost, která dělá z dřeva vhodný tepelně izolační materiál. V současné době se staví nízkoenergetické dřevostavby, které snižují potřebu tepla na vytápění. Šetří tak energetické zdroje, čímž se omezuje produkce emisí CO₂ v ovzduší. Místo toho, aby energie ze dřeva byla zbytečně

uložena na skládce odpadů, poskytuje uhlíkově neutrální náhradu za fosilní paliva. Oxid uhličitý CO_2 , který byl ze dřeva vzat během růstu stromů, se vrací do atmosféry a tak spalování dřeva nepřispívá ke globálnímu oteplování nebo ke skleníkovému efektu. Energie ze dřeva obsahuje málo síry a dusíku, které přispívají ke kyselým dešťům, a mimoto produkuje malé množství popela. [5]

Mezi výhody dřevěných konstrukcí patří také estetické vlastnosti dřeva jako třeba přírodní textura, barva a vůně, která je člověku příjemná.



Obrázek 2: Kanadský srubový dům [2]

Dřevo je recyklovatelný materiál. Na konci svého prvního použití mohou být dřevo a dřevěné výrobky buď opět použity (recyklovány), nebo použity jako uhlíkově neutrální zdroje energie.

Dřevo vytváří minimální odpad při svém zpracování (výroba oken, dveří, nábytku, apod.) jako jsou piliny, štěpky a odřezky, které se dále používají k výrobě tepla a energie pro sušárny anebo jsou použity jako surovina pro výrobu dřevotřískových desek a v papírenském a celulózním průmyslu.

Roční spotřeba dřeva v Evropě je uváděna na 160 milionů tun, z čehož je 15 milionů tun každoročně recyklováno a množství recyklátů do budoucna ještě výrazně vzroste, neboť legislativa brzo nebude umožňovat ukládat dřevěný odpad na skládkách. Legislativa také bude požadovat ohledně odpadů z obalů, aby 15 % všech dřevěných obalů bylo recyklovatelných. Tímto vznikne nový zdroj obnoveného dřeva použitelný pro recyklaci dokonce i ve skandinávských zemích, kde je dřevní suroviny dostatek. Dalším kladným faktorem svědčícím o nárůstu recyklovatelnosti je zvýšení počtu internetových služeb podporujících růst obchodu, nejen nabízející obchodní služby, ale kompletní logistický servis jako přepravu z domu do domu, administrativu, zpracování, třídění, vzorkování a analýzu. [8]

3.4 Nevýhody dřevostaveb

Nevýhodou dřevostaveb je uváděna trvanlivost a to zejména dřevěných konstrukcí, které se nacházejí v nechráněných expozicích, případně v klimaticky extrémních podmínkách. Na druhou stranu, trvanlivost dřevostaveb je až 50 let, což je pro běžné občanské stavby zcela dostačující. [5]

Dřevo je specifické tím, že je to ortotropně – anizotropní materiál, což znamená, že v každém směru má různé vlastnosti. Dále vlivem vlhkosti dochází k objemovým i tvarovým změnám, tudíž není vhodná do všech typů konstrukcí.

Na dřevě jsou často patrné jeho přirozené znaky (vady) jako suky (viz obrázek 3), boule, trhliny, smolníky, křivosti, apod. Tento jev lze však eliminovat vizuálním tříděním dřeva na stavební konstrukce, popřípadě lze rostlé dřevo upravit lepením s vyříznutím kazů.



Obrázek 3: Dřevěný suk [1]

Nevýhodou dřevěných konstrukcí je nižší odolnost proti živelním pohromám, jako je vichřice nebo uragán. Na druhé straně se ale dřevostavby osvědčily při záplavách, nebo v seizmických oblastech, protože v případě zemětřesení nižší hmotnost dřevěné konstrukce produkuje nižší setrvačné síly, opláštění, např. ze sádrovláknitých desek, brání vybočení nebo klopení dřevěné konstrukce a tím ztrátě nosnosti a stability budovy. Chování dřevostaveb je kromě toho pozitivně ovlivňováno houževnatostí nosné konstrukce. [9]

Záměrně jsem zde neuvedl problematiku požární odolnosti dřevěných konstrukcí, přestože je zcela zásadní, a co se týká dřevostaveb, tak je jedním z mylných faktorů negativně ovlivňující lidi při koupi materiálu na stavbu rodinného domu. Této oblasti se budu věnovat v další kapitole.

3.5 Využití dřeva

V současné době si dřevěné konstrukce našly využití v mnoha oblastech: montované rodinné domy, hrázdné stavby, lehké střešní konstrukce, vícepodlažní budovy, haly pro zemědělské a sportovní účely, speciální stavby (kostely, reprezentační stavby, apod.), konstrukce schodišť, nábytek, rámy výplní stavebních otvorů, lávky pro pěší a cyklisty (viz obrázek 4) a mnoho dalších.

[1]



Obrázek 4: Lávka v Essingu [1]

4 VLASTNOSTI DŘEVA ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty

[35]

Obecná představa mnohých lidí o chování dřeva při požáru bývá často mylná a zkreslená. Je sice pravda, že dřevo díky svému chemickému složení (uhlík 49,5 %; vodík 6,3 %; kyslík 44,2 %, dusík 0,2%) lze zapálit, může vyživovat oheň a dále ho šířit, ovšem jeho chování při požáru je celkem předvídatelné a šíření plamene lze omezit povrchovými úpravami nebo impregnací.

[6]

4.1 Chování za požáru

Pokud je dřevo vystaveno požáru, nejdříve vzplane a poté hoří, dokud se na jeho povrchu nevytvoří zuhelnatělá vrstva dřevní hmoty. Tato vrstva je specifická tím, že brání přístupu vzduchu do vnitřní části průřezu prvku a tím tlumí hoření. Mimo jiné má i dobré tepelně izolační vlastnosti, díky kterým je teplota ve zbytkovém průřezu prvku v malé vzdálenosti od povrchu neměnná. Mechanické a fyzikální vlastnosti se tak nemění a při návrhu průřezu je možné postupovat stejně jako při návrhu za běžné teploty; v potaz se musí brát akorát úbytek únosnosti, který je dán redukcí průřezu vlivem účinku požáru. Redukce průřezu je způsobena prostupujícím ohněm hlouběji do průřezu.

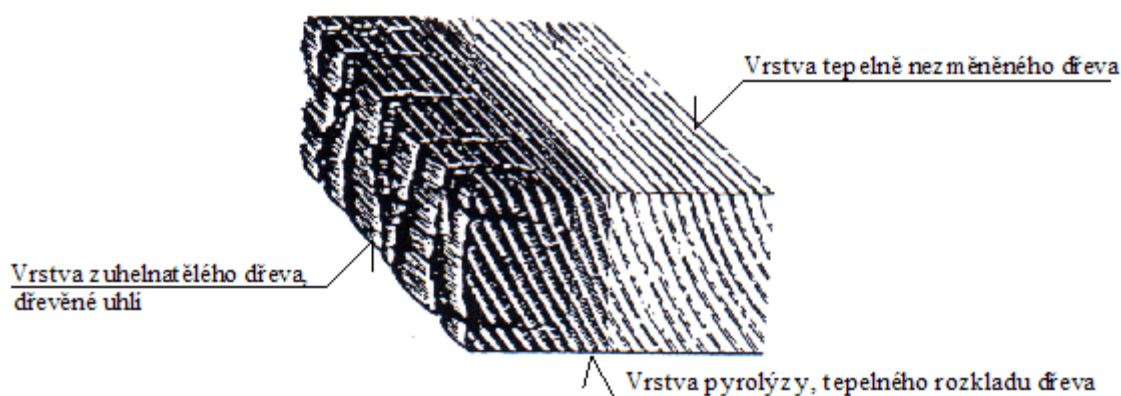
[6]

Další dobrou vlastností dřeva je, že při požáru nedochází k tvorbě trhlin a povrch tak zůstává uzavřený a dále „chráněný“ zuhelnatělou vrstvou dřevní hmoty.

[6]

Když je dřevo vystaveno požáru přibližně 20 min, tak se 30 mm pod zuhelnatělou vrstvou vytvoří další vrstva, která je zasažena vysokou teplotou. Součástí této vrstvy je i vrstva pyrolýzy o tloušťce 5 mm.

[6]



Obrázek 5: Změna dřeva v průřezu konstrukčního prvku při požáru [6]

Hořlavost nebo šíření plamene po povrchu dřeva lze redukovat povrchovou úpravou nebo impregnací, nelze však dosáhnout nehořlavosti materiálu, přestože energie potřebná pro

zapálení dřeva bude výrazně větší. Jsou dvě skupiny chemických prostředků, které omezují šíření plamene po povrchu nebo snižují hořlavost materiálu:

Amonné soli – Vznikají reakcí amoniaku (azanu) s kyselinami. Jsou velmi dobře rozpustné a při vysokých teplotách se rozkládají na plynné zplodiny, které zabraňují přístupu vzduchu.

Pěnotvorné (intumescentní) vícesložkové systémy – Obsahují pojivo, nadouvadlo a retardéry hoření (sloučeniny boru). Při vyšších teplotách se vytvoří vrstva pěny, která izoluje materiál před přístupem vzduchu. Tyto prostředky jsou nejúčinnější (dokážou snížit třídu reakce na oheň na B), vzhledově přijatelné a mají vyšší životnosti, která se předpokládá minimálně 10 let. [6]

Dále je třeba poukázat na obtížnou zápalnost rostlého dřeva, které jen zřídka kdy bylo zapáleno dříve než jiný materiál. Rostlé dřevo dokonce vyžaduje i pro samovznícení (zapálení bez přítomnosti zdroje zapálení) povrchovou teplotu větší než 400°C a větší než 300°C s přítomností zdroje zapálení. Pro srovnání, 10 metrů dlouhý ocelový nosník vystavený teplotě 400°C se prodlouží o 50 mm. Dokonce i materiálové vlastnosti oceli i betonu by se při této teplotě redukovaly. [6]

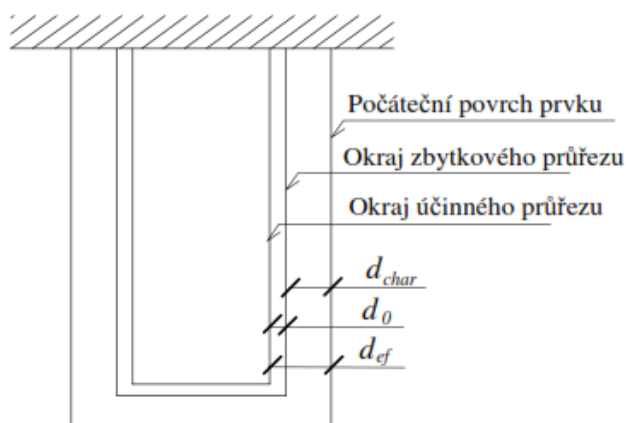
Důležitým faktorem při hoření prvku ze dřeva je jeho tvar, povrch, obvod a rozměr průřezu: Hořlavost je závislá na poměru povrchu průřezu k objemu prvku a šíření plamene po povrchu prvku bude narůstat s tímto rostoucím poměrem. Například kruhový a hladký (hoblovaný) povrch má tento poměr malý, a tím pádem bude příznivější než povrch, který je drsný (nehoblovaný) a má mnoho ostrých hran. [6]

4.2 Výpočetní metody

Pro navrhování dřevěných konstrukcí při zvýšených teplotách se obecně používají stejné postupy jako pro navrhování při pokojové teplotě. [7]

4.2.1 Metoda účinného průřezu

Při použití metody účinného průřezu se uvažuje průřez bez zvětšené vrstvy zuhelnatění (účinný průřez), která kompenzuje neměnné parametry pevnosti a tuhosti. [7]



Obrázek 6: Zbytkový a účinný průřez [6]

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 \cdot d_0 \quad (1)$$

d_0 - vrstva s předpokládanou nulovou pevností (požár delší než 20 min; $d_0 = 7$ mm)

d_{char} – hloubka zuhelnatění

k_0 – upravující součinitel, závislý na délce trvání požáru

4.2.2 Metoda redukované pevnosti a tuhosti

Při použití metody redukované pevnosti a tuhosti se uvažuje průřez bez vrstvy zuhelnatění (zbytkový průřez), s uvážením poklesu parametrů pevnosti a tuhosti.

$$d_{char} = \beta_0 \cdot t \quad (2)$$

β_0 – rychlost zuhelnatění [mm/min]

t – čas, po který je dřevo vystaveno účinkům požáru [min]

Návrhová pevnost a modul pružnosti zbytkového průřezu se redukují součinitelem $k_{mod,fi}$, který se pro různé pevnosti (v ohybu, v tlaku, v tahu) a pro modul pružnosti počítá z různých vzorců v závislosti na obvodu zbytkového průřezu namáhaného požárem a na ploše zbytkového průřezu. [7]

4.2.3 Obecná metoda

Při použití obecné metody se uvažuje stav teploty a vlhkosti v kterémkoliv bodě zbytkového průřezu dřevěného průřezu a také vztah mezi parametry vlhkosti a teploty materiálu na jedné straně a tuhosti a pevnosti na druhé straně. [7]

5 VYUŽITÍ DŘEVA NA VÍCEPDLAŽNÍ BUDOVY

[35]

Dřevěné obytné domy mají v Evropě více než 3000 let dlouhou historii a tradice roubených a těžkých skeletových variant, vytvořené zvláště v posledních cca 500 letech, se v různé podobě a míře promítají i do současnosti.

Vícepodlažní budovy na bázi dřeva se v současné době dostávají stále více do popředí zájmu developerů a stavitelů, převažující je zejména skeletový konstrukční systém. Vícepodlažní dřevostavby mají oproti betonovým a ocelovým budovám celou řadu výhod, patří k nim především (krom výhod uvedených výše):

[10]

- Investiční a energetická nenáročnost výrobců;
- rychlost a nesezónnost výstavby;
- vysoký stupeň lehké prefabrikace a snížení požadavků na zařízení staveniště;
- vysoká produktivita práce při výrobě a montáži;
- nižší zatížení základů a tím i nižší náklady na jejich realizaci (proto jsou vhodné k zástavbě tzv. brownfields);
- minimální vliv na okolní stavby;
- dispoziční flexibilita;
- rozměrová přesnost;
- tepelná účinnost;
- nižší cenové náklady na provoz oproti betonovým stavbám;
- dobrý odhad pořizovacích nákladů;
- krátkodobé vázání kapitálu;
- dobré vlastnosti z hlediska životního prostředí.



Obrázek 7: moderní vícepodlažní dřevostavba [8]

5.1 Problém z hlediska požární bezpečnosti

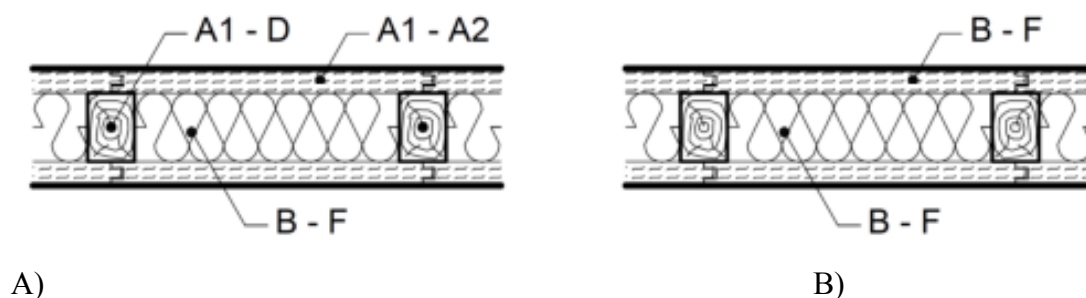
Kvůli požadavkům na požární ochranu staveb se musí dodržovat určitá pravidla a omezení. U vícepodlažních dřevostaveb se musí z technického hlediska věnovat zvýšená pozornost jejich požární bezpečnosti.

Dřevěné konstrukce se z hlediska hořlavosti řadí do konstrukčního systému hořlavého. Jedná se o konstrukční systémy, které se skládají z konstrukčních druhů typu DP2 nebo DP3, případně kombinace, která neodpovídá konstrukčnímu systému nehořlavému ani smíšenému.

Konstrukce druhu DP1 nezvyšují v požadované době požární odolnosti intenzitu požáru [11], obsahují pouze nehořlavé materiály.

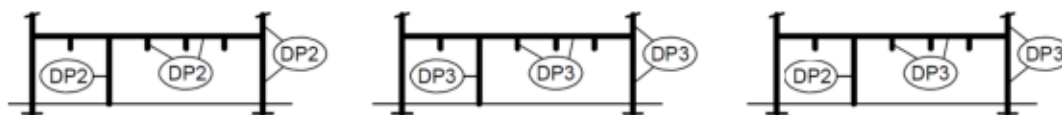
Konstrukce druhu DP2 nezvyšují v požadované době požární odolnosti intenzitu požáru, ale obsahují i hořlavé hmoty, na nichž je závislá stabilita a únosnost konstrukce [11], viz obrázek 8A).

Konstrukce druhu DP3 zvyšují v požadované době požární odolnosti intenzitu požáru; zahrnují konstrukční dílce a prvky, které nesplňují požadavky na konstrukce druhu DP1 a DP2 (např. sestavené pouze z hořlavých hmot [11], viz obrázek 8B). Mezi konstrukce druhu DP3 patří například stěny a stropy dřevostaveb nebo dřevěné požární dveře. Druh konstrukce a údaj s požární odolností uvádějí výrobci v technických listech na základě požárních zkoušek.



Obrázek 8: Vícevrstvé konstrukce druhu: A) DP2; B) DP3 [15]

Na obrázku 3 je příklad možné dřevěné konstrukce skládající se z materiálů s třídou reakce na oheň od A1 do F, kdy A1 a A2 jsou nehořlavé výrobky a B – F jsou hořlavé výrobky, přičemž dřevo je výrobek s třídou reakcí na oheň D. [11]



A)

B)

C)

Obrázek 9: Druhy konstrukčních systémů z požárního hlediska: A) hořlavý – pouze DP2; B) hořlavý – pouze DP3; C) hořlavý – kombinace DP2 a DP3 [15]

Na obrázku 9 je příklad možné dřevostavby skládající se z konstrukčních druhů DP2, DP3, nebo jejich kombinace.

S hořlavým konstrukčním systémem je spjata mnoho problémů s požárně nebezpečným prostorem a následně vznikajícími odstupovými vzdálenostmi (viz kapitola 6). Ovšem požadavky na požární bezpečnost vícepodlažních dřevostaveb jsou přeceňovány. Když bychom šli do důsledku, tak z hlediska požární odolnosti dřevěný sloup 500 x 500 mm vydrží stejně tak dlouho jako železobetonový sloup stejného průřezu.

5.2 Předpisy z hlediska požární odolnosti

V souvislosti s trendy používat dřevo na vícepodlažní dřevostavby byl vypracován první návrh předpisů z hlediska požární odolnosti [7]: [16]

- Omezení vzniku výsušných trhlin – do konstrukce použít materiál s rovnovážnou vlhkostí;
- pro nosné konstrukce používat celistvých prvků z rostlého, lepeného a vrstveného dřeva s absencí dutin a spár (vhodné je vyhlazení povrchů prvků, zaoblení jejich hran);
- stěny a příčky navrhovat bez dutin, pokud jsou však dutiny ve stěnách nezbytné, je třeba použít požárních zářezek proti šíření požáru po výšce stěn i příček;
- tepelná izolace v konstrukci musí být z nehořlavých materiálů;
- zdvojovat stěny mezi bytovými jednotkami (vkládat do vnitřních příček těchto stěn vrstvu nehořlavého materiálu);
- u osových vzdáleností sloupků stěn a stropnic v lehkých skeletech nepřekračovat vzdálenost 625 mm;
- v interiéru chránit dřevěný skelet obkladem, který oddálí působení požáru na nosný systém;
- střešní ventilační otvory umísťovat mimo okenní otvory;
- provětrávané střešní pláště navrhovat s automatickými protipožárními uzávěry;
- použití podokenní a nadokenní parapety na fasádě, které zmírní šíření požáru po fasádě objektu;

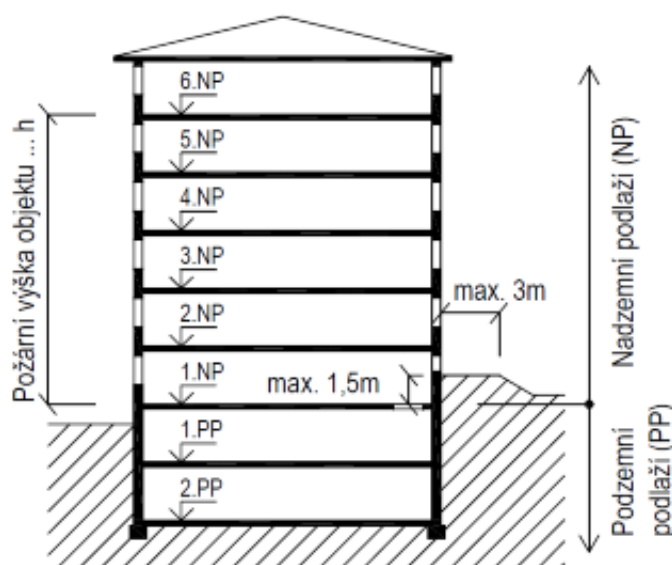
- zajištění identifikace a likvidace zárodku požáru – instalovat požární hlásiče, automatické zhášecí systémy.

Požární odolnost konstrukcí vícepodlažních dřevostaveb lze obecně zjišťovat několika možnými způsoby: [17]

1. klasifikací podle výsledků zkoušek konkrétního druhu konstrukční části dle [12]
2. pomocí normové hodnoty dle [13] nebo [14], případně výpočtem
3. zkouškou a výpočtem v těch případech, že zkouškou nelze postihnout všechny činitele ovlivňující požární odolnost anebo pokud výsledky zkoušek vyžadují pro konkrétní aplikaci další posouzení

5.3 Problém z hlediska legislativy

V mnoha zemích tvoří požární předpisy hlavní překážku využití dřeva ve stavebnictví a to hlavně ohledně stanovení maximální požární výšky (v různých zemích jinak definovaná) viz obrázek 10, případně počtu podlaží.



Obrázek 10: Požární výška objektu h v ČR a SR [15]

Hořlavý konstrukční systém z obrázku 9 je omezen požární výškou, která se v květnu roku 2009 v ČR zvýšila z 9 m na 12 m, což umožňuje stavět dřevostavby až o 5 podlažích při konstrukční výšce do 3,0 m. Toto zvýšení požární výšky znamená velký přínos a nové možnosti pro dřevěné konstrukce. Avšak nesmíme zapomenout, že objekty, které mají požární výšku od 9 m do 12 m, musí mít navrženou chráněnou únikovou cestu, tedy konstrukci DP1 (konstrukce z nehořlavých nosných prvků) staticky nezávislou na konstrukcích DP2 a DP3.

[17]

Omezení počtu podlaží v Evropě:

[20]

- 7 a více podlaží – 9 zemí (např. Švédsko, Norsko,...)
- 4 – 6 podlaží – 12 zemí (např. Rakousko, Německo,...)
- 1 – 3 podlaží – 9 zemí (např. Island, Polsko,...)

Omezení požární výškou v Evropě:

[20]

- 9 m (např. Slovenská republika)
- 12 m (např. Česká republika)
- 18 m (např. Ukrajina)

Mimo Evropy je neomezený počet podlaží v dřevostavbách povolen pouze na Novém Zélandu.

[19, 20]

Tabulka 2: Počet podlaží povolených podle stavebních předpisů v severských zemích [20]

	1994	1997	1999	2003
Švédsko	∞	∞	∞	∞
Norsko	2	∞	∞	∞
Finsko	2	4	4	∞
Dánsko	1-2	1-2	4	∞

V tabulce 2 je uvedeno, jak se stavební předpisy severských zemí postupně měnily a povolovaly použití dřeva na vícepodlažní budovy. Od roku 2003 není počet podlaží ve výše uvedených zemích z hlediska legislativy omezen.

[21]



Obrázek 11: Potencionální zájem trhu o vícepodlažní budovy ze dřeva [18]

Z grafu je patrné, že potencionální zájem trhu o vícepodlažní budovy ze dřeva je vysoký, ovšem v některých zemích bohužel prozatím nerealizovatelný. Požární bezpečnost dřevostaveb je dána evropskými normami, ale dovolená výška zůstává stále národní odpovědností. Z tabulky 2 je patrné, že za předpokladu splnění řady požadavků, které mají protipožární charakter (např. použití sprinklerů, retardérů hoření v dřevěných obkladech fasád), tuto problematiku řešit lze.

6 Odstupové vzdálenosti

[35]

6.1 Názvosloví

[11]

Požárně nebezpečný prostor

Požárně nebezpečný prostor je oblast kolem hořícího objektu vymezená odstupovými vzdálenostmi od požárně otevřených ploch, ve které je nebezpečí přenesení požáru sáláním tepla nebo odpařování částmi konstrukcí DP3. Uvažuje se větší z hodnot.

Odstupová vzdálenost

Jedná se o hranici požárně nebezpečného prostoru, kde hodnota tepelného toku je nižší než $18,5 \text{ kW/m}^2$. Odstupová vzdálenost je kolmá vzdálenost od požárně otevřených ploch k hranici požárně nebezpečnému prostoru.

Zcela požárně otevřená plocha

Zcela požárně otevřená plocha je plocha obvodové stěny vykazující na straně vnějšího líce větší hustotu tepelného toku než 60 kW/m^2 v požadované době požární odolnosti (dřevostavby, okna,...).

Částečně požárně otevřená plocha

Částečně požárně otevřená plocha je plocha obvodové stěny vykazující na straně vnějšího líce větší hustotu tepelného toku než 15 kW/m^2 avšak nejvýše 60 kW/m^2 v požadované době požární odolnosti (zděná stěna s dřevěným obkladem, železobetonová stěna s otvorem,...).

Požárně uzavřená plocha

Požárně uzavřená plocha je plocha obvodové stěny vykazující na straně vnějšího líce menší hustotu tepelného toku než 15 kW/m^2 v požadované době požární odolnosti (železobetonová stěna, zděná stěna,...).

Základní mezní stavy:

R (t) – Nosnost konstrukce;

E (t) – Celistvost konstrukce;

I (t) – Tepelná izolace konstrukce;

W (t) – Hustota tepelného toku či radiace z povrchu konstrukce.

6.2 Požadavky na obvodové stěny

Požární odolnost obvodových konstrukcí se hodnotí z vnitřní a vnější strany. Z vnitřní strany se hodnotí, zdali jde o požárně otevřené nebo požárně uzavřené plochy, zatímco z vnější strany se hodnotí, zdali jde o stěny nacházející se v požárně nebezpečném prostoru nebo o stěny tvořící požární pásy. V tabulce 3 jsou uvedena kritéria, která musí příslušné obvodové stěny splňovat. [22]

Tabulka 3: Kritéria vlastností

Část obvodové stěny	Funkce obvodové stěny	
	Zajišťující stabilitu objektu	Nezajišťující stabilitu objektu
	Kritéria vlastností	
Vnitřní strana	REW	EW
Vnější strana	REI	EI

Hustota tepelného toku, která se uvolní při kompletním spálení hořlavého materiálu, se stanovuje pomocí zjednodušené Stefan – Boltzmannova zákona vyjadřující principy sálání tepla.

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_N + 273)^4 - (T_0 + 273)^4] \quad (3)$$

kde: I [W/m²] – hustota tepelného toku od plně rozvinutého požáru

ε [-] – emisivita pro plně rozvinutý požár

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W. m⁻². K⁻⁴] – Stefan – Boltzmannova konstanta

T_N [°C] – teplota hořících plynů – viz vztah (4)

T_0 [°C] – počáteční teplota před požárem

$$T_N = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot p + 1) \quad (4)$$

kde: T [°C] – teplota hořících plynů v interiéru podle normové teplotní křivky

t [min] – čas od začátku požáru $\approx p$ [kg/m²] – požární zatížení

Při hodnocení požárně otevřených plochách obvodových plášťů se stanovuje množství uvolněného tepla z hořlavých výrobků

$$Q = \sum_{i=1}^j H_i \cdot M_i \quad (5)$$

kde: Q [MJ/m²] – množství uvolněného tepla

M_i [kg/m²] – plošná hmotnost i -tého druhu hořlavé hmoty umístěné na vnějším povrchu obvodové stěny

H_i [MJ/kg] – výhřevnost i-tého druhu hořlavé hmoty vnějšího povrchu
obvodové stěny

Tabulka 4: Vyhodnocení požadavků ČSN na obvodové konstrukce zajišťující stabilitu objektu

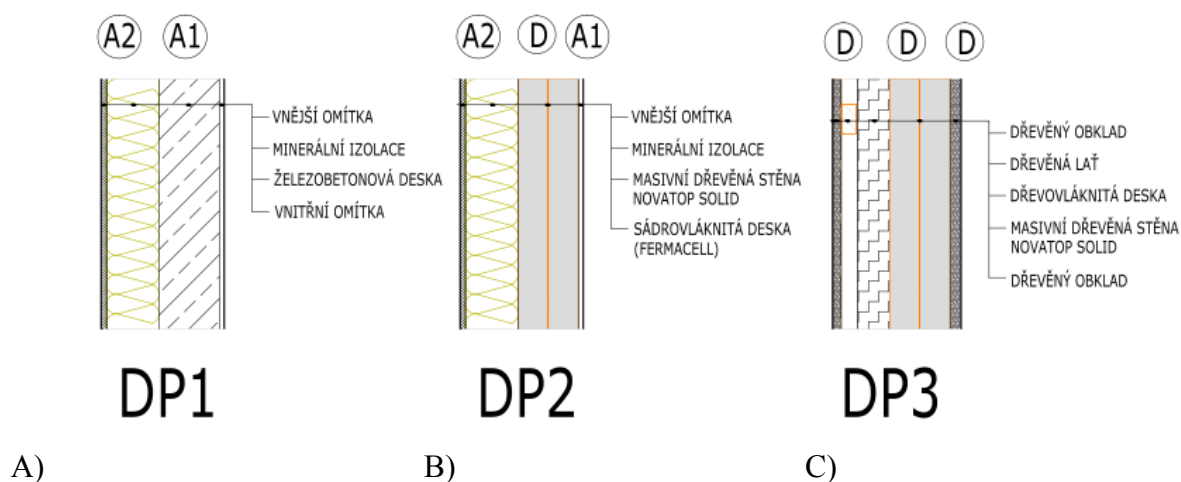
	Požárně uzavřená plocha	Částečně požárně otevřená plocha	Zcela požárně otevřená plocha
R (t)	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje
E (t)	Vyhovuje	Vyhovuje	Nevyhovuje
W (t) [kW.m ⁻²]	W (t) < 15	15 < W (t) < 60	W (t) > 60
Q [MJ.m ⁻²]	Q < 150	150 < Q < 350	Q > 350

V tabulce 4 je uvedeno vyhodnocení požadavků ČSN na obvodové konstrukce zajišťující stabilitu objektu. Z tabulky je zřejmé, že zcela požárně otevřená plocha nevyhovuje na mezní stav celistvosti a nemá žádné požadavky na hustotu tepelného toku ani na množství uvolněného tepla, zatímco požárně uzavřená plocha má na tyto kritéria požadavky dosti přísné.

6.3 Příklad skladby obvodové stěny v závislosti na odstupové vzdálenosti

Níže jsou uvedeny tři příklady skladeb obvodových konstrukcí konstrukčních systému DP1, DP2 a DP3, které jsou vysvětleny v kapitole 5. Stěny konstrukce DP1 (viz obrázek 12 A) a konstrukce DP2 (viz obrázek 12 B) se posuzují jako požárně uzavřené plochy, ovšem v tomto příkladu je budu posuzovat jako částečně požárně otevřené plochy, neboť se v této stěně bude nacházet okno. Okno jsem do zdi zvolil, protože požárně uzavřené plochy pro mě nejsou nijak zajímavé, neboť se u nich nestanovují odstupové vzdálenosti a požárně nebezpečný prostor. Stěna konstrukce DP3 (viz obrázek 12 C) se posuzuje jako zcela požárně otevřená plocha.

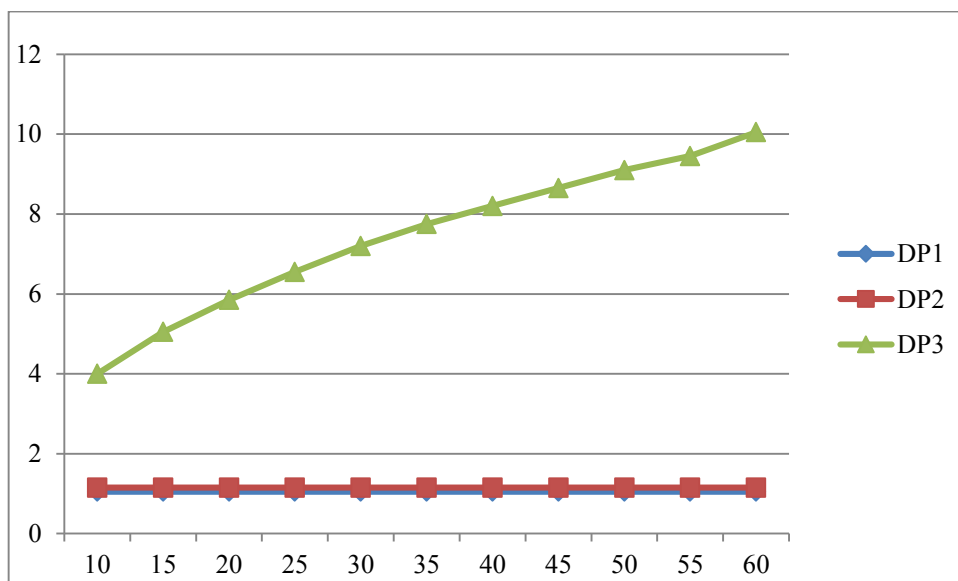
Cílem tohoto příkladu je poukázat na velké rozdíly odstupových vzdáleností, jedná-li se o částečně požárně otevřenou plochu, nebo zcela požárně otevřenou plochu. Dále chci poukázat na závislost odstupových vzdáleností na ploše obvodové stěny a ploše otvoru v ní (okna). Rozdíly odstupových vzdáleností konstrukčních systémů DP1, DP2 a DP3 je zajímavé sledovat především z důvodů umístění objektu z daného konstrukčního systému na pozemek.



Obrázek 12: Příklady skladeb obvodových konstrukcí: A) konstrukce DP1; B) konstrukce DP2, C) konstrukce DP3 [23]

Budeme uvažovat stěnu rodinného domu o ploše $A_{\text{stěny}} = 10 \text{ m}^2$ s oknem o ploše $A_{\text{okna}} = 3 \text{ m}^2$, požární výpočtové zatížení $p_v = 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, přičemž se uvažuje přírůstek o $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ u konstrukčního systému DP2 a o $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ u konstrukčního systému DP3 dle [11]; konstrukční systém se bude měnit dle posuzované obvodové stěny, odstupové vzdálenosti jsou vypočteny dle [24].

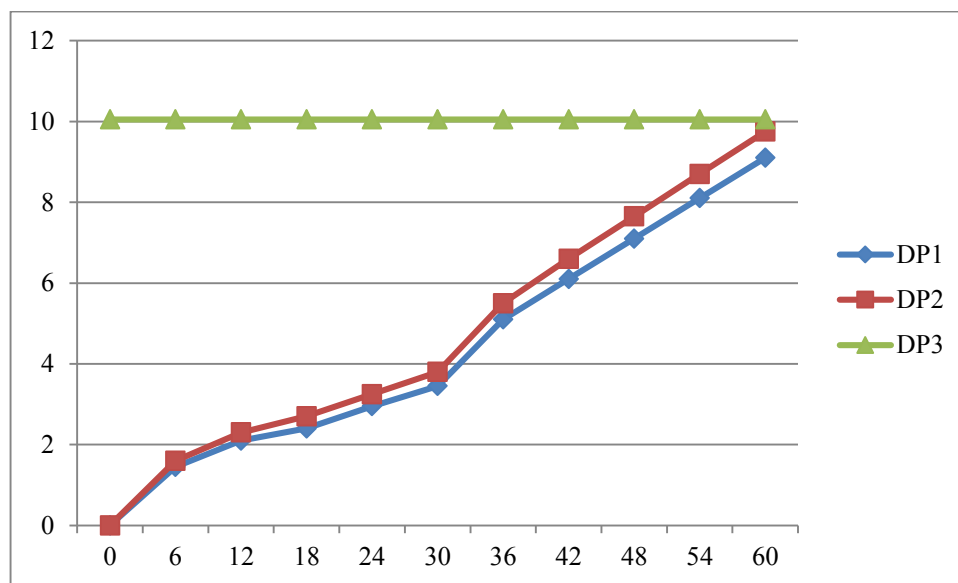
- a) Určení odstupových vzdáleností, když plocha okna zůstává 3 m^2 , zatímco plocha stěny bude narůstat od 10 m^2 do 60 m^2 .



Graf 1: Odstupové vzdálenosti v závislosti na ploše stěny

Z obrázku 13 je patrné, že konstrukce DP1 a DP2 zůstávají konstantní, neboť se jedná o částečně požárně otevřené plochy a v tom případě nárůst odstupových vzdáleností je závislý na nárůstu požárně otevřené plochy (okna), která zůstává konstantní. Konstrukce DP2 má nepatrně větší odstupovou vzdálenost než konstrukce DP1, což je dáno navýšením požárního výpočtového zatížení konstrukce DP2 o $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ oproti konstrukci DP1. Konstrukce DP3 má výrazně největší odstupovou vzdálenost, která při ploše stěny 60 m^2 (což je plocha obvodové stěny průměrného baráku) činí něco málo přes 10 m.

b) Určení odstupových vzdáleností, když plocha stěny zůstává 60 m^2 , zatímco plocha okna bude narůstat od 0 m^2 do 60 m^2 .



Graf 2: Odstupové vzdálenosti v závislosti na ploše okna

Z obrázku 14 je patrné, že konstrukce DP3 zůstává konstantní na hodnotě cca 10 m, protože se jedná o zcela požárně otevřenou plochu, tudíž nárůst odstupové vzdálenosti je závislý na nárůstu ploše požárně otevřené plochy (stěny), která zůstává konstantní. Křivky odstupových vzdáleností konstrukcí DP1 a DP2 stoupají, neboť narůstá plocha požárně otevřené plochy (okna), přičemž křivka konstrukce DP2 se pomalu oddaluje z důvodu nárůstu požárního výpočtového zatížení konstrukce o $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Při ploše okna 0 m^2 je odstupová vzdálenost konstrukcí DP1 a DP2 rovna nule, neboť v tomto případě se jedná o požárně uzavřené plochy.

6.4 Problematika umístování dřevostaveb na pozemek

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že dřevostavby konstrukce druhu DP3 mají největší odstupové vzdálenosti, a tím pádem největší požárně nebezpečný prostor, což může být v praxi značným problémem, neboť v požárně nebezpečném prostoru nemohou být umístěny jiné objekty (ani jiný požární úsek téhož objektu) z důvodu přenesení možného požáru sáláním tepla nebo odpadáváním částí konstrukcí DP3, které zde ovšem neřeším. Výjimku tvoří pouze tyto dva body:

[11]

- a) Objekty umístěné v požárně nebezpečném prostoru mají obvodové stěny bez požárně otevřených ploch a nehořlavé povrchové úpravy třídy reakce na oheň A1 nebo A2. Případné dodatečné zateplení obvodových stěn musí vykazovat index šíření plamene po povrchu $i_s = 0$.
- b) Objekty umístěné v požárně nebezpečném prostoru mají střešní plášť bez požárně otevřených ploch, který je z konstrukce DP1 klasifikován Broof (t3), případně plášť, který nešíří požár.

Když bychom například chtěli vedle stávající dřevostavby postavit nový objekt, musíme brát ohledy na velký požárně nebezpečný prostor dřevostavby se skladbou obvodové stěny konstrukce DP3 a dodržet dostatečnou vzdálenost objektů, což je ve stísněných prostorách mnohdy velkým problémem a někdy i neřešitelné.

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Vzrůstající zájem o dřevostavby vede k nutnosti hlubšího poznání dřevěných konstrukcí a jejich chování za požáru. Praktickým ukazatelem bývají požární zkoušky. Ty probíhají buď v malém formátu, tzv. malorozměrové zkoušky (ve zkušebních pecích), nebo ve velkém formátu - velkorozměrové zkoušky (části budov nebo celá budova). V této kapitole se budu věnovat pouze velkorozměrové zkoušce a to konkrétně požární zkoušce modelu dřevostavby v Rýmařově.

7.1 Požární zkouška v Rýmařově

Dne 24. 4. 2014 v 11 hodin se uskutečnila v areálu firmy RD Rýmařov s. r. o. velkorozměrová požární zkouška modelu dřevostavby. Zkouška byla realizována v rámci projektu OPVK „Inovace studijních programů a posílení mezioborové spolupráce v oblasti navrhování a požární bezpečnosti budov“ CZ.1.07/2.2.00/28.0008. Hlavním řešitelem projektu se stala Fakulta stavební VŠB ve spolupráci s Fakultou bezpečnostního inženýrství VŠB a Moravskoslezským dřevařským klastrem. [25]



Obrázek 13: Umístění zkušebního objektu

7.1.1 Informace o objektu

Zkušební objekt byl jednopodlažní o půdorysných rozměrech 4 x 5,5 m. Světla výška objektu byla 2,5 m. Dispozičně byl objekt rozdělen na dvě místnosti. Menší z místností měla půdorysnou plochu 5,6 m² a představuje kuchyň. V místnosti se nacházelo okno o šířce

980 mm a výšce 1440 mm. Výška parapetu okenního otvoru byla 350 mm. Do objektu (kuchyně) vedly vchodové dveře orientované směrem na západ. [26]

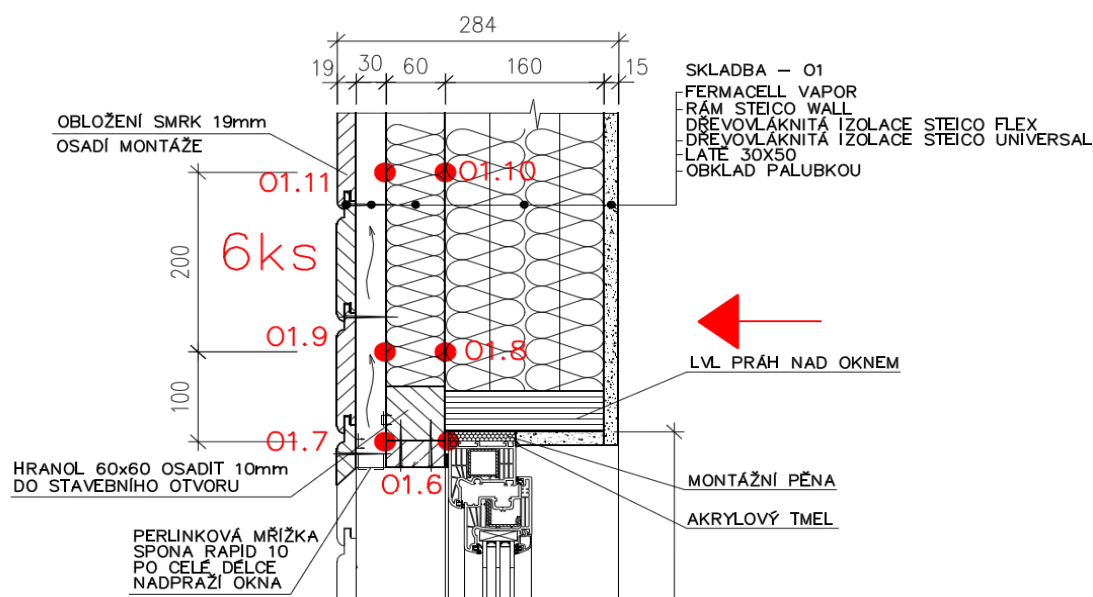
Druhá místnost měla půdorysnou plochu 11,75 m², představuje obytný prostor. V místnosti se nenacházel okenní otvor, ale otvor, na který byl vodorovně napojen tubus vytvořený z desek typu Fermacell. Tubus měl délku 3 m, průřez 700 x 700 mm a sloužil k odvodu kouře. Byly v něm umístěny komponenty měřicích zařízení. [26]

Obvodová konstrukce objektu byla navržena ze dvou systémů. V případě omítnuté části objektu se jednalo o systém RD Rýmařov a v případě vnějšího obložení smrkovými palubkami se jednalo o systém Steico. [26]



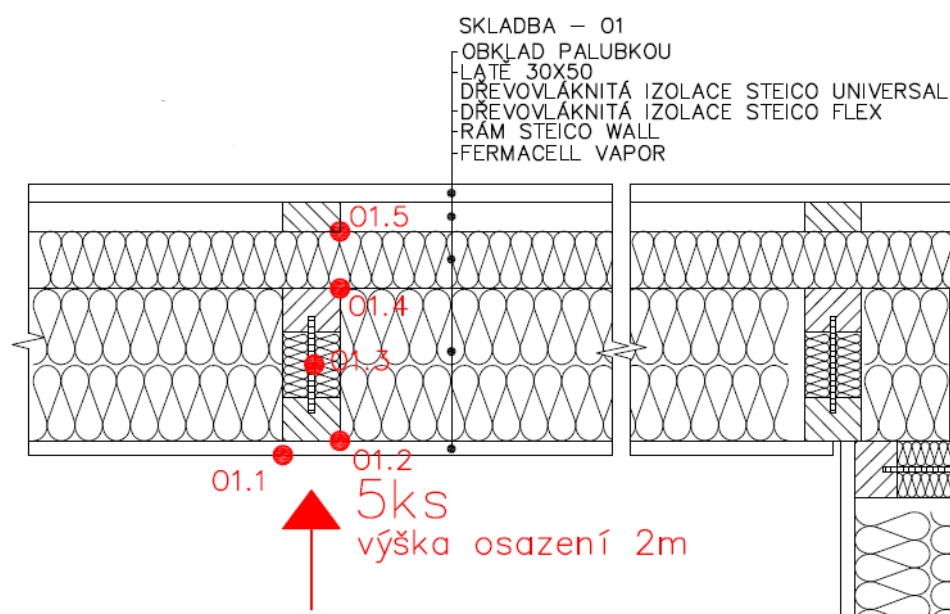
Obrázek 14: Zkušební objekt

DETAIL A:



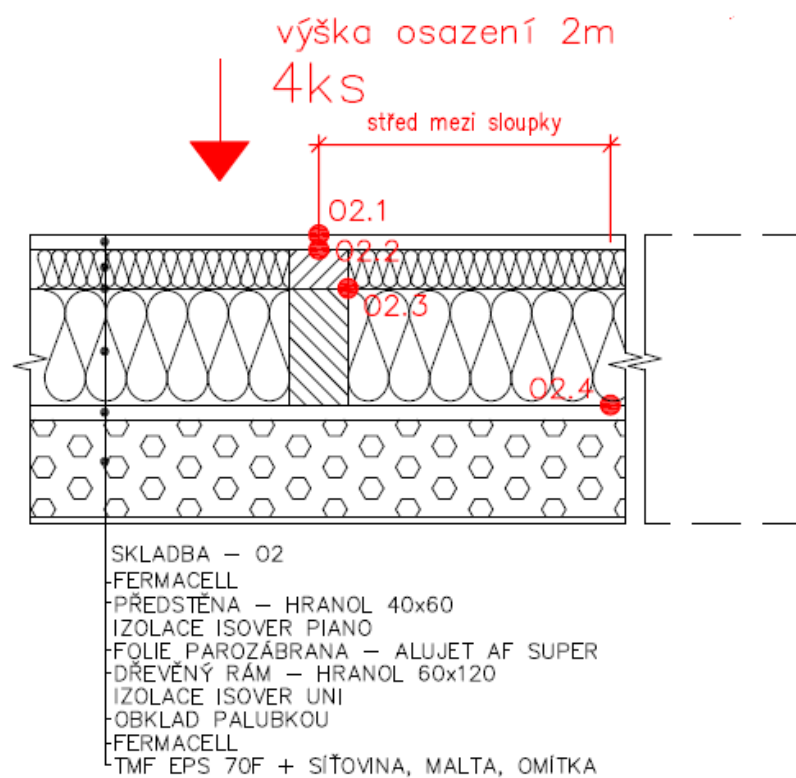
Obrázek 16: Detail skladby nadpraží okna včetně umístění termočlánků [26]

DETAIL B:



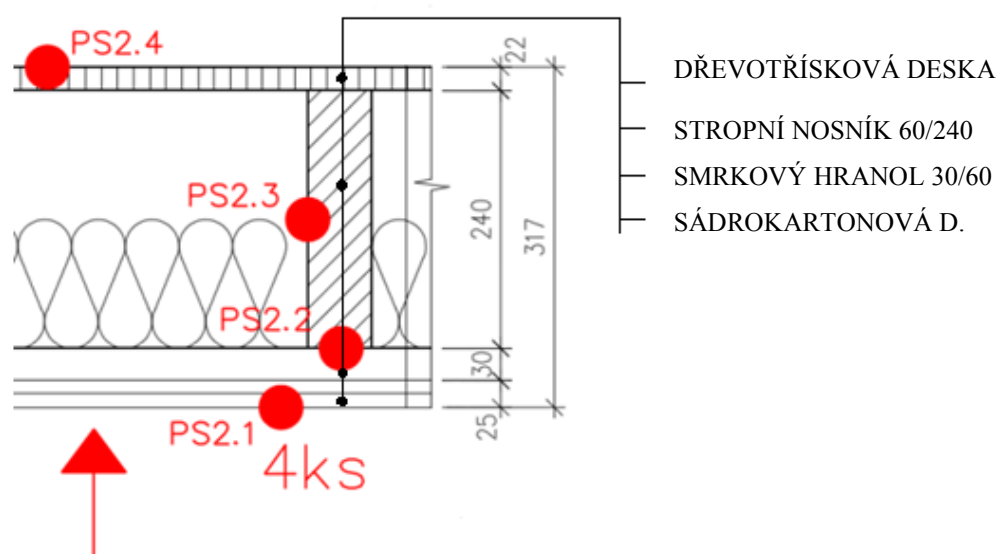
Obrázek 17: Detail skladby stěny systému Steico včetně umístění termočlánků [26]

DETAIL C:



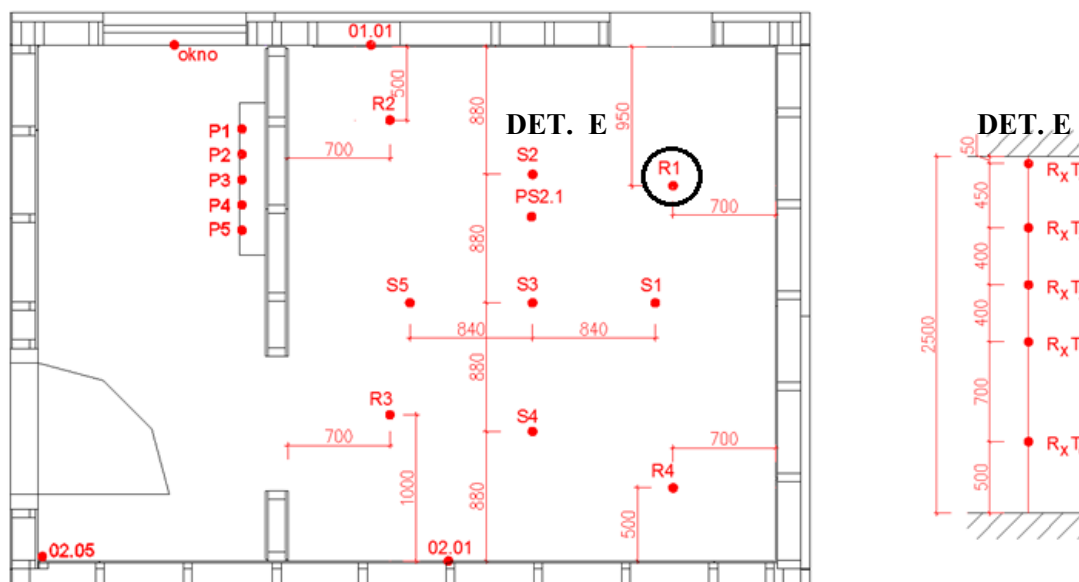
Obrázek 18: Detail skladby stěny systému RD Rýmařov, s.r.o. včetně umístění termočlánků [26]

DETAIL D:



Obrázek 19: Detail skladby stropu včetně umístění termočlánků [26]

Termočlánky pro měření teploty byly umístěné nejenom v konstrukci stěn a stropu (viz. Detaily A, B, C, D), ale také v prostoru obytné místnosti v podobě řetězu (viz. Obrázek 20, 21, 22), dále na stropní konstrukci a na povrchu nádob umístěných na polici v kuchyni.



Obrázek 20: Rozmístění termočlánků pro měření teplot na stropní konstrukci [26]

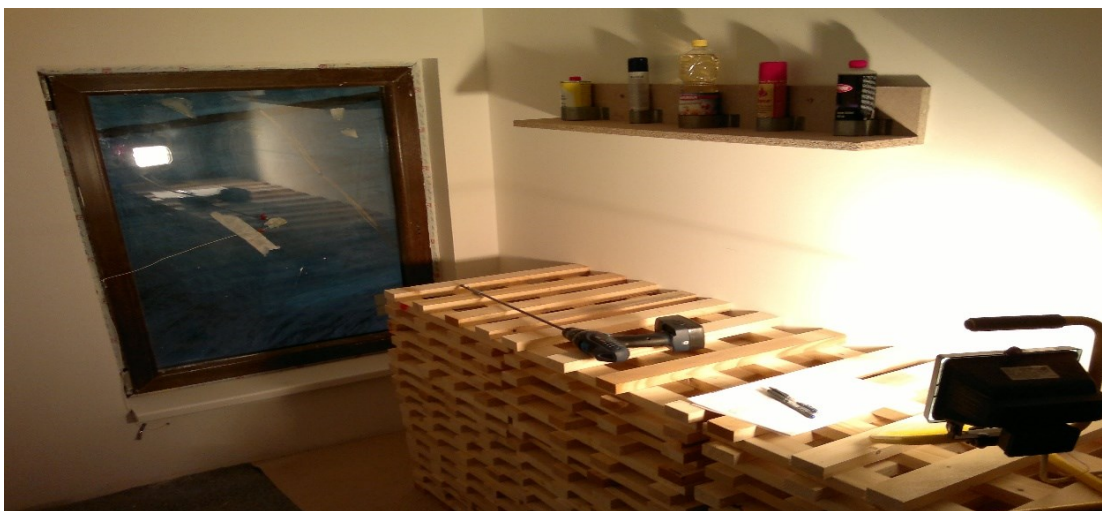
P1, P2, P3, P4, P5 – termočlánky na povrchu nádob,
R1, R2, R3, R4 – termočlánky umístěné v prostoru v podobě řetězu,
S1, S2, S3, S4, S5 – termočlánky umístěné na stropní konstrukci,
ostatní termočlánky jsou znázorněny v předchozích detailech A, B, C, D.



Obrázek 21, Obrázek 22: Rozmístění termočlánků pro měření teplot [26]

7.1.3 Požární zatížení

Na přípravě velkorozměrové zkoušky se podílelo několik desítek lidí. Jejich snahou bylo dodržet normované požární zatížení bytového prostoru, proto do menší místnosti (kuchyně) naskládali hraničky ze smrkových hranolků 40 x 60 mm. Dále byla na stěnu připevněna polička, na které byly umístěny prostředky denní potřeby, konkrétně ředidlo, lak na vlasy, jedlý olej, plynová náplň do zapalovačů a motorový olej (viz. Obrázek 23). [26]



Obrázek 23: Vyskládané hraničky ze smrkového dřeva a polička s prostředky denní potřeby

Ve větší místnosti (obytné místnosti) bylo požární zatížení tvořeno nábytkem. V prostoru se konkrétně nacházela čalouněná sedačka s dřevěnou konstrukcí, konferenční stůl, židle z masivního dřeva a šatní skříň z dřevotřísky. Dále, aby bylo v prostoru dosaženo normové hodnoty pro bytové prostory (40 kg.m^{-2}), bylo požární zatížení doplněno hraničkami smrkových hranolků (viz. Obrázek 24). [26]



Obrázek 24: Schéma rozmístění nábytku a hraniček v obytné místnosti [26]

7.1.4 Průběh požární zkoušky

Velkorozměrová zkouška byla zahájena 24. 4. 2014 v 11:24 zapálením ½ litru technického lihu v prostoru kuchyně. V den zkoušky bylo polojasné počasí a slabý vítr foukající ve směru vchodových dveří, který nikterak neovlivňoval hoření. Níže je popsán průběh požární zkoušky v závislosti na čase. Dále jsou v této kapitole znázorněny obrázky (25, 26, 27, 28, 29) počínaje zapálením, přes rozhořívání, flashover, plně rozvinutý požár až po dohašení požáru jednotkou HZS.

Průběh požární zkoušky v čase

[32]

- 1. minuta: Počátek požární zkoušky
- 8. minuta: Dochází k intenzivnímu vývinu zplodin hoření.
- 12. minuta: V tento okamžik došlo k prasknutí okenní tabule v místnosti kuchyně.
Aby se zachoval směr toku zplodin hoření, byla připravena dřevěná zástěna, kterou hasiči přistavili ke zdi, aby opět uzavřela okenní otvor.
- 20. minuta: Dochází k pozvolnému prohoření krycí zástěny.
- 23. minuta: Objekt dřevostavby přechází do třetí fáze požáru.
- 34. minuta: Začíná hořet vnější plášť budovy.
- 50. minuta: Doba, ve které končí hodnocení požáru dřevostavby pro účely této diplomové práce.
- 57. minuta: Dochází k prohoření tubusu napojeného z vnější strany na okno z obývacího prostoru dřevostavby.
- 64. minuta: Hašení objektu, konec velkorozměrové zkoušky požáru dřevostavby.



Obrázek 25: Zapálení vaničky s technickým lihem [26]



Obrázek 26, obrázek 27: Rozhořívání zkušebního objektu



Obrázek 28: Plně rozvinutý požár modelu dřevostavby



Obrázek 29: Dohašení požáru jednotkou HZS

7.1.5 Naměřené hodnoty

Z velkorozměrové zkoušky bylo naměřeno několik charakteristických veličin. Teploty, tepelná radiace, složení zplodin hoření, proudění zplodin hoření, optická hustota zplodin hoření a tlakové rozdíly v objektu. Ovšem pro účely modelování a výpočtů v této diplomové práci budou dostačující naměřené teploty z termočlánků a to především teploty zaznamenané v konstrukcích výše uvedených detailů A, B, C, D (kapitola 7.1.2).

Výsledky měření teplot v profilech stavebních konstrukcí

Tabulka 5: Průběh teplot v konstrukci z detailu A a detailu B závislé na čase [27]

Čas [min]	DETAIL A [°C]			DETAIL B [°C]			
	okno zevnitř	01.10	01.11	01.1	01.2	01.4	01.5
0	18,4	15,0	16,6	17,4	17,3	15,4	18,5
2	23,4	15,5	17,6	33,6	17,3	15,4	16,3
4	56,4	15,7	17,7	110,3	19,2	15,8	17,5
6	164,0	15,0	17,2	166,7	24,0	15,5	18,2
8	332,9	15,2	17,5	196,9	32,9	15,4	14,9
10	313,9	15,2	17,7	193,1	47,6	15,5	18,4
12	288,2	15,3	17,9	235,1	59,8	15,3	18,4
14	391,3	16,1	31,2	302,6	79,1	15,7	18,6
16	206,7	15,7	27,5	191,0	102,5	15,8	18,9
18	288,2	33,9	34,7	256,6	105,1	15,4	17,5
20	374,2	77,4	32,7	339,1	107,6	15,3	19,7
22	819,7	457,8	421,1	408,6	114,1	15,4	19,4
24	783,0	725,1	687,1	508,9	119,9	15,4	18,0
26	866,2	868,2	864,3	437,0	129,5	18,9	19,7
28	916,9	865,1	878,1	542,2	132,8	28,4	18,3
30	860,7	840,6	792,6	509,1	135,3	40,2	17,8
32	890,7	857,5	857,8	588,0	137,9	46,1	21,4
34	749,4	609,7	725,8	607,7	143,9	49,1	19,5
36	697,1	469,8	624,6	656,0	154,3	51,2	21,5
38	740,9	477,4	430,3	651,4	201,1	53,0	22,6
40	803,6	546,9	660,3	705,3	256,6	62,7	20,9
42	836,2	511,7	262,1	367,0	251,9	71,6	20,3
44	771,8	549,2	291,6	392,6	332,6	72,6	22,5
46	802,5	484,8	286,8	304,1	377,5	72,3	24,0
48	589,1	530,7	477,4	400,5	409,6	76,1	25,5
50	663,9	459,4	297,2	410,7	465,6	76,5	25,6

01.10, 01.11, 01.1, 01.2, 01.4, 01.5 – Označení termočlánků podle detailu A a detailu B (kapitola 7.1.2).

Tabulka 6: Průběh teplot v konstrukci z detailu C a detailu D závislé na čase [27]

Čas [min]	DETAIL C [°C]				DETAIL D [°C]			PROSTOR
	02.1	02.2	02.3	02.4	PS2.1	PS2.2	PS2.4	R3T3
0	17,8	17,3	16,0	15,5	17,9	15,7	24,0	17,4
2	36,3	17,5	16,4	15,8	83,3	15,8	23,4	50,3
4	138,4	18,9	17,1	16,5	229,9	16,2	24,4	154,9
6	222,8	21,3	16,3	15,7	327,5	16,0	26,3	237,8
8	303,6	28,8	17,2	16,5	399,4	18,7	22,9	312,7
10	277	45,0	17,5	16,2	318,2	30,2	23,2	280,7
12	355,4	61,3	19,5	16,0	334,5	45,6	23,8	344,5
14	547,9	81,5	29,0	16,4	426,7	54,1	22,7	509,1
16	363,5	92,6	66,6	16,8	230,5	63,7	23,7	321,6
18	446,3	99,9	96,8	16,7	277,3	69,8	22,2	396,9
20	580,3	101,5	98,2	16,9	279,2	74,9	27,1	497,7
22	684,2	107,5	98,6	17,3	423,1	83,5	24,8	543,1
24	680,9	114,5	99,5	17,8	418,1	85,9	25,0	595,4
26	562,3	123,4	99,9	18,5	374,7	90,7	25,7	507,1
28	664,3	123,8	98,8	18,2	574,2	90,7	25,8	588,1
30	628,9	127,2	98,7	18,2	522,4	90,8	26,3	564,0
32	666,4	130,8	99,2	19,0	696,6	88,4	28,0	653,2
34	490	135,3	98,9	19,0	682,7	90,3	28,0	607,6
36	664,5	154,0	95,5	19,3	762,0	91,8	28,6	757,6
38	671,1	192,4	97,9	18,9	759,7	93,2	29,8	752,1
40	764,7	257,3	95,6	19,5	874,5	92,4	31,3	883,8
42	716,1	298,2	95,9	20,3	719,8	94,2	30,4	747,8
44	784,9	344,3	94,5	20,4	820,8	91,6	31,3	829,9
46	754,4	378,8	93,3	22,8	812,3	95,1	31,1	764,9
48	879,3	427,7	109,8	29,4	800,4	640,5	686,1	1039,4
50	878,6	479,0	190,6	31,4	887,8	801,6	866,1	840,1

02.2, 02.3, 02.4, PS2.2, PS2.4 – označení termočlánků podle detailu C a detailu D (kapitola 7.1.2)

Výše v tabulkách jsou uvedeny naměřené teploty z povrchu konstrukcí, na rozhraní vrstev materiálů v konstrukcích a ve vnitřním prostoru objektu. Všechny tyto hodnoty použijte a to jako vstupní hodnoty do výpočtů, nebo kontrolní body při srovnávání výsledků výpočtů a modelování.

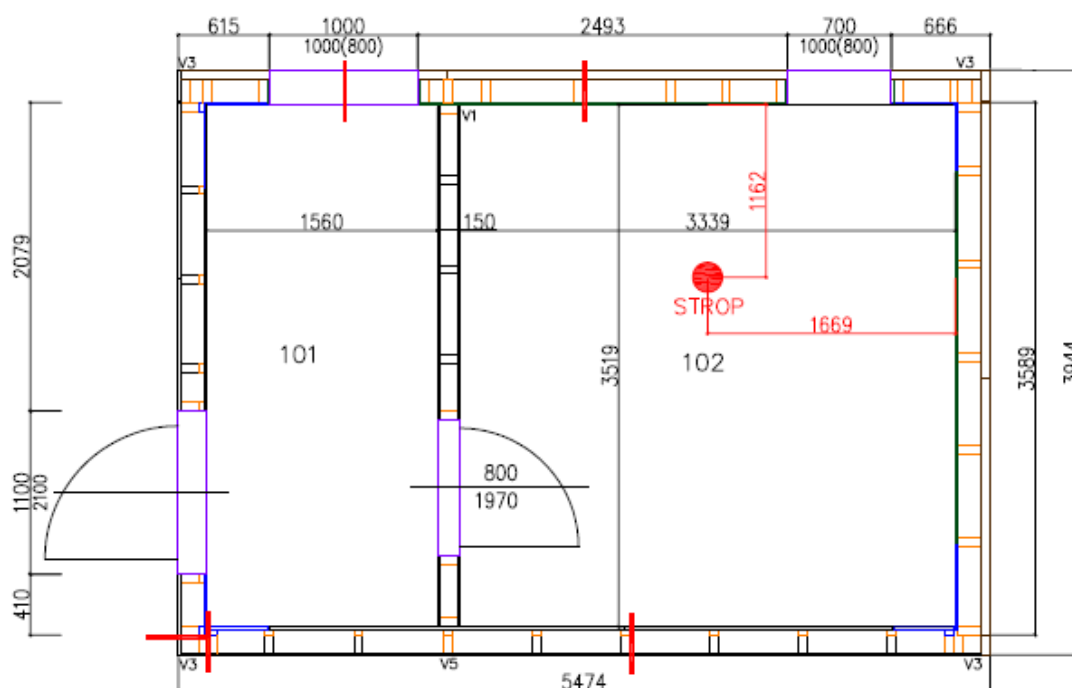
7.2 Analytické řešení

7.2.1 Parametrická teplotní křivka

vypočteno dle [29]

Teplotu plynu uvnitř požárního úseku budu řešit pomocí parametrické a nominální normové teplotní křivky. Pomocí parametrické teplotní křivky lze přesně definovat veškeré charakteristiky požárního úseku a uvažuje fázi chladnutí. Měla by být tedy mnohem přesnější oproti nominálním teplotním křivkám, které nepotřebují žádné vstupní parametry a neuvažují fázi chladnutí.

[28]



Obrázek 30: Půdorys zkušebního objektu [26]

Součinitel otvorů

$$O = \frac{\sum A_v}{A_t} \cdot \sqrt{h_{eq}} = \frac{0,7+1+2,31}{(8,7975.2+12,6225.2+17,7674.2)} \cdot \sqrt{1,634} = 0,0654 \text{ m}^{1/2} \quad (6)$$

$$h_{eq} = \frac{\sum A_v \cdot h}{\sum A_v} = \frac{0,7 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2,31 \cdot 2,1}{0,7+1+2,31} = \frac{6,551}{4,01} = 1,634 \text{ m} \quad (7)$$

$$0,02 < 0,0654 < 0,2$$

A_v Plocha otvoru

A_t Plocha všech povrchů v požárním úseku (včetně otvoru)

h_{eq} Průměrná výška otvoru

Vlastnosti obvodové konstrukce

$$b_1 (\text{fermacell vapor}) = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{1200 \cdot 1100 \cdot 0,32} = 649,923 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \quad (8)$$

$$b_2 (\text{dřevo smrkové}) = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{470 \cdot 1450 \cdot 0,2} = 369,188 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

$$b_1 > b_2$$

649,923 > 369,188 >> určí se limitní tloušťka

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{3600 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}} = \sqrt{\frac{3600 \cdot 0,691 \cdot 0,32}{1100 \cdot 1200}} = 0,024557 \text{ m} \quad (9)$$

$$s_1 < s_{lim}, 0,015 < 0,024557$$

$$b = \frac{s_1}{s_{lim}} \cdot b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) \cdot b_2 = \frac{0,015}{0,024557} \cdot 649,923 + \left(1 - \frac{0,015}{0,024557}\right) \cdot 369,188 = \quad (10)$$

$$= 540,668 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

$$100 < 540,668 < 2200 >> \text{vyhovuje}$$

Čas pro maximální teplotu

Požár řízený palivem

$$t_{lim} = 25 \text{ min} = 0,417 \text{ hod (pro malou rychlost rozvoje požáru)}$$

$$t_{max,f} = t_{lim} = 0,417 \text{ hod}$$

Požár řízený ventilací

Charakteristické požární zatížení

$$Q_{fi,k} = \Sigma M_{k,i} \cdot H_{u,i} \cdot \Psi_i = 440 \cdot 20 + 160 \cdot 17 + 48 \cdot 27 + 35 \cdot 27 + 1 \cdot 25 = 13,786 \text{ MJ} \quad (11)$$

Charakteristická hustota požárního zatížení

$$q_{f,k} = \frac{Q_{fi,k}}{A_f} = \frac{13,786}{17,5} = 787,8 \text{ MJ/m}^2 \quad (12)$$

Návrhová hustota požárního zatížení

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q,1} \cdot \delta_{q,2} \cdot \delta_n = 787,8 \cdot 0,8 \cdot 1,5 \cdot 1,1 = 945,36 \text{ MJ/m}^2 \quad (13)$$

Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená k celkové ploše

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot \frac{A_f}{A_t} = 945,36 \cdot \frac{17,7674}{74,365} = 225,867 \text{ MJ/m}^2 \quad (14)$$

$$t_{max,v} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}}{o} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 225,867}{0,0654} = 0,691 \text{ hod} \quad (15)$$

$$t_{max} = \max(t_{max,f}, t_{max,v}) = \max(0,417, 0,691) = 0,691 \text{ hod} \quad (16)$$

>> požár je řízený ventilací

Tabulka 7: Požární zatížení a celková hmotnost zařizovacích předmětů [26]

Místnost	S [m ²]	p _n [kg.m ⁻²]	m _{dřevo} [kg]	m _{dřevotř} [kg]	m _{PUR} [kg]	m _{PES} [kg]	V _{láh} [l]
Kuchyně	5,5	43	220	-	-	11 kg	1
Obytná místnost	12	41	220	160	48	24 kg	-

Tabulka 8: Výchřevnosti materiálů vyskytujících se ve zkušebním objektu [26]

Materiál	ρ [kg.m ⁻³]	Q _{výchř} [MJ.kg ⁻¹]
Smrkové dřevo	455	17
Dřevotříska	600	17
Dubové dřevo	660	20
PUR	40	27
PES		27
Technický líh		25
Olej		42
Nitro ředidlo		34

Fáze ohřívání

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{o}{o_{ref}}\right)^2}{\left(\frac{b}{b_{ref}}\right)^2} = \frac{\left(\frac{0,0654}{0,04}\right)^2}{\left(\frac{540,668}{1160}\right)^2} = 12,31 \quad (17)$$

$$t^* = \Gamma \cdot t = 12,31 \text{ t [hod]} \quad (18)$$

$$\theta_{g,t} = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (19)$$

$$\theta_{max} = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^{*max}} - 0,204e^{-1,7t^{*max}} - 0,472e^{-19t^{*max}})$$

$$t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma = 0,691 \cdot 12,31 = 8,506 \text{ hod} \quad (20)$$

$$\theta_{max} = 1266,7 \text{ °C}$$

Fáze chlazení

$$\begin{aligned} \theta_g &= \theta_{max} - 250 (t^* - t_{max}^* \cdot X) = 1266,7 - 250 \cdot (12,31 \text{ t} - 8,503 \cdot 1) = \\ &= 3392,45 - 3077,5 \text{ t} \end{aligned} \quad (21)$$

$$t_{max}^* = \left(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{o}\right) \cdot \Gamma = \left(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{225,867}{0,0654}\right) \cdot 12,31 = 8,503 \text{ hod} \quad (22)$$

$$t_{max} = 0,691 \text{ hod} = 41,5 \text{ min} > t_{lim} = 25 \text{ min} \gg X = 1$$

7.2.2 Nominální teplotní křivky

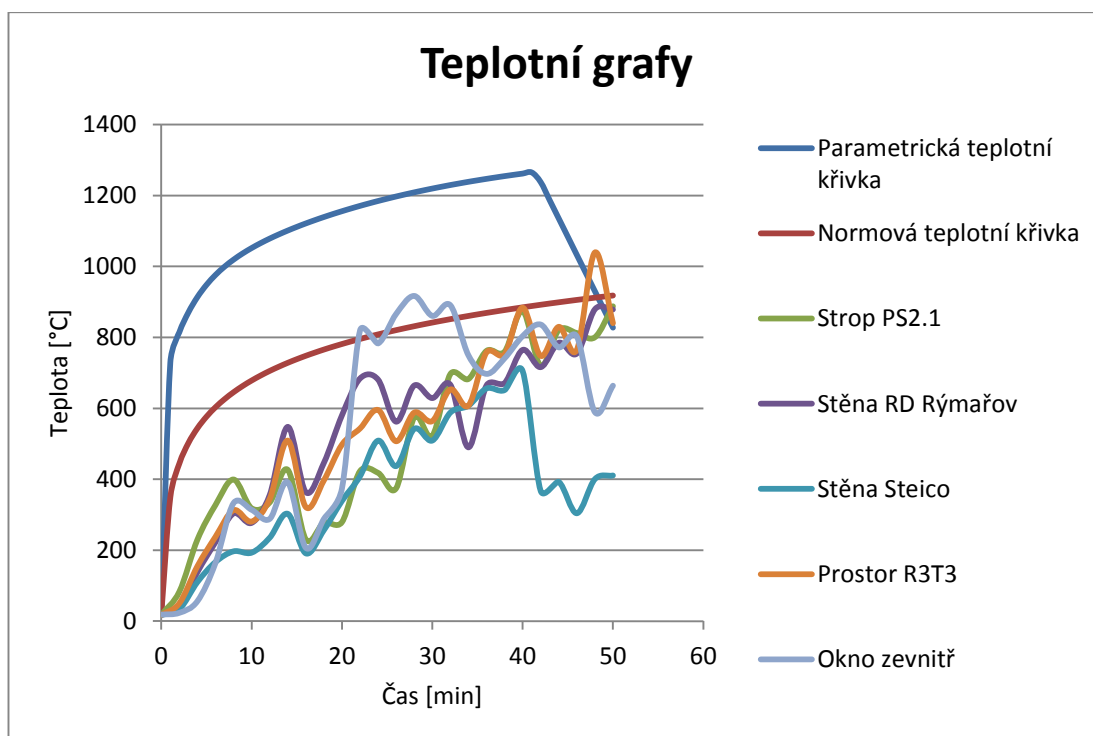
Mezi nominální teplotní křivky řadíme normovou teplotní křivku, pro modelování plně rozvinutého požáru. Dále teplotní křivku vnějšího požáru, která je určená pro obvodové stěny zasažené požárem z vnější strany požáru. A Uhlovodíkovou teplotní křivku pro požáry kapalných látek a paliv. Pro tento příklad je vhodné použít normovou teplotní křivku. [28]

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (23)$$

t Čas [min]

7.2.3 Vstupní teploty

Níže je uveden graf 3, který nám znázorňuje srovnání teploty plynu určené parametrickou a normovou teplotní křivkou s naměřenými teplotami pomocí termočlánků umístěných na vnitřním povrchu konstrukcí a v prostoru. Z grafu je zřejmé, že přestože by parametrická teplotní křivka měla být přesnější oproti normové teplotní křivce, v tomto případě tomu tak není. Toto může být způsobeno tím, že otvor okna byl po rozbití uzavřen krycí zástěnou. Tímto se mohly změnit poměry odvětrávání.



Graf 3: Srovnání teplotních křivek s naměřenými teplotami na povrchu kci a v prostoru

7.2.4 Výpočet přestupu tepla v konstrukci

vypočteno dle [30, 31]

V tabulkách níže jsou uvedeny vrstvy materiálů jejich tloušťky, součinitele tepelné vodivosti, měrná tepla a hustoty pro vstupy do výpočtů a modelování přestupu tepla v konstrukci. Jsou v nich uvedeny pouze vrstvy materiálů, které se nachází v řezu, kde jsou umístěny termočlánky a kudy je veden výpočet přestupu tepla. Výpočet teploty v jejich vrstvách tak bude porovnatelný se skutečnými naměřenými hodnotami.

Tabulka 9: Skladba konstrukce detailu A

DET A - Skladba obvodové stěny Steico (nadpraží)	δ [m]	λ [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]
(1) Sádroláknitá deska Fermacell Vapor	0,015	0,38	1100	1200
(2) Dřevovláknitá izolace Steico flex	0,16	0,038	2100	50
(3) Dřevovláknitá izolace Steico univerzal	0,06	0,048	2100	270
(4) Dřevěné latě	0,03	0,15	1450	425
(5) Dřevěná smrková fasáda	0,019	0,15	1450	425

Tabulka 10: Skladba konstrukce detailu B

DET B - Skladba obvodové stěny Steico	δ [m]	λ [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]
(1) Sádroláknitá deska Fermacell Vapor	0,015	0,38	1100	1200
(2) Rám Steico wall	0,16	0,13	1600	500
(3) Dřevovláknitá izolace Steico univerzal	0,06	0,048	2100	270
(4) Dřevěné latě	0,03	0,15	1450	425
(5) Dřevěná smrková fasáda	0,019	0,15	1450	425

Tabulka 11: Skladba konstrukce detailu C

DET C - Skladba obvodové stěny RD Rýmařov	δ [m]	λ [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]
(1) Sádroláknitá deska Fermacell	0,015	0,38	1100	1200
(2) Rám z hranolu	0,04	0,15	1450	425
(3) Dřevěný rám smrkový	0,12	0,15	1450	425
(4) Sádroláknitá deska Fermacell	0,015	0,38	1100	1200
(5) Fasádní polystyren EPS 70F	0,1	0,039	1270	16

Tabulka 12: Skladba konstrukce detailu D

DET D - Skladba stropu	δ [m]	λ [W/(m.K)]	c [J/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]
(1) Dřevotřísková deska	0,022	0,11	1500	800
(2) Stropní nosník ze smrku	0,24	0,15	1450	425
(3) Dřevěný hranol ze smrku	0,03	0,15	1450	425
(4) Sádkartonová deska standard	0,025	0,22	1060	750

Součinitel přestupu tepla

U vnitřního požáru na konstrukci působí horké plyny, jde o konvekci a přenos tepla se řeší formou přestupu tepla. Ten popisuje Newtonova rovnice. Současně působí tepelné záření a přenos tepla popisuje Stefan-Boltzmannův zákon. Pro případ požáru se tepelné působení slučuje, popisuje rovnici „Newtonovou“, do které vstupuje celkový součinitel přestupu tepla, který vyjadřuje konvekci i radiaci ($\alpha=11,63 \dots$). V rámci prostupu tepla stěnou se na odvráceném povrchu opět slučuje odvod tepla ze stěny konvekci a radiací do celkového součinitele přestupu tepla. Jde o jiné tepelné působení a hodnotu tohoto součinitele jde vypočítat ($\alpha=1,163\dots$).

$$\alpha_i = 11,63 \cdot e^{0,0023 \cdot t_i} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (24)$$

$$\alpha_e = 1,163 \cdot \left(7 + \frac{t_e}{t_o}\right) [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (25)$$

Při zatížení normovou a parametrickou teplotní křivkou je součinitel přestupu tepla jak pro interiér, tak pro exteriér tedy závislý na vzrůstající teplotě a tím pádem i na čase.

Při zatížení předem naměřenými teplotami se bude uvažovat součinitel přestupu tepla pro interiér konstantní s hodnotou 1, neboť předem naměřené teploty jsou naměřené z povrchu dané konstrukce (teplo již přestoupilo na povrch konstrukce a není tedy nutné součinitel počítat). Součinitel přestupu tepla pro exteriér bude opět závislý na vzrůstající teplotě a tím pádem i na čase.

Stanovení hustoty tepelného toku

$$q = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (26)$$

t_i Teplota v interiéru [°C]

t_e Teplota v exteriéru [°C]

t_0 Teplota počáteční (20°C)

α_i Součinitel přestupu tepla v interiéru [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

α_e Součinitel přestupu tepla v exteriéru [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

δ_i Tloušťka i-té vrstvy [mm]

λ_i Součinitel tepelné vodivosti i-tého materiálu [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

Určení teplot na rozhraní jednotlivých vrstev

$$q = \alpha_e \cdot (t_e - t_0) \quad \text{odtud} \quad t_e = \frac{q}{\alpha_e} + t_0 \quad [^\circ\text{C}] \quad (27)$$

Pro účely tohoto příkladu byla vytvořena funkce výpočtů v programu Microsoft Excel, pomocí které byly vypočteny teploty konstrukce v bodech umístění termočlánků. Jako vstupní hodnoty do výpočtu byly zadány teploty z parametrické teplotní křivky, normové teplotní křivky a naměřené teploty z vnitřních povrchů konstrukce. Zmíněný Excel je přiložen na disku CD u diplomové práce.

Výsledky z této kapitoly jsou uvedeny v kapitole 7.4, kde jsou dále porovnávány se skutečnými naměřenými hodnoty a s výstupy z programu Ansys.

7.3 Numerické řešení

[33, 34]

K provedení numerické teplotní analýzy konstrukce byl použit program ansys inc. Ansys je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze provádět jednotlivě, ale také kombinovaně v jedné komplexní analýze. Ansys (Analysis Systems) patří od roku své existence (1970) ke špičkovým inženýrským systémům využívající metodu konečných prvků. Od začátku se používá v klasických oborech, jakými jsou strojírenství, automobilová a dopravní technika, energetika. Ovšem v posledních letech se využívání tohoto programu rozšířilo také do dalších oblastí, jakými jsou stavební praxe, nebo různé specializované obory jako například biomechanika.

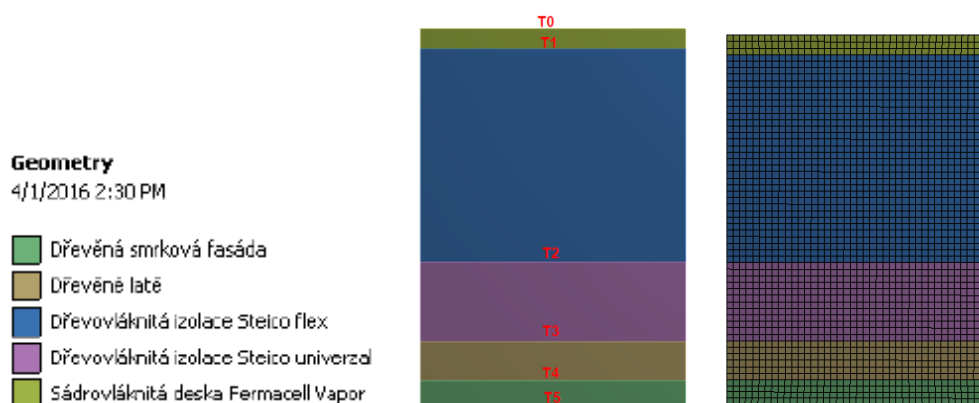
7.3.1 Postup modelování

Postup řešení pro výpočet teploty na rozhraní jednotlivých vrstev stěny:

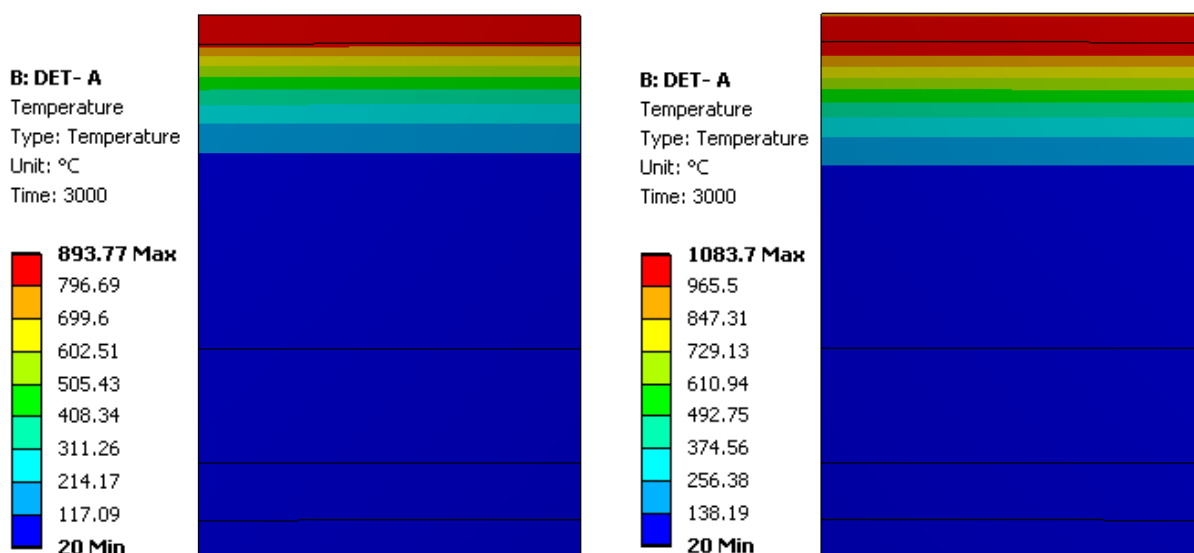
1. Zvolení typu analýzy
2. Zvolení vhodného prvku pro tvorbu sítě a materiálových charakteristik
3. Tvorba geometrie
4. Vytvoření sítě
5. Zadání okrajových podmínek
6. Vyřešení úlohy
7. Zhodnocení výsledků

Pro tento příklad je nutné zvolit termální analýzu. Dále pro diskretizaci úloh přestupu tepla byl použit prvek Plane 77, který je pokročilejší verze prvku Plane 55. Prvek má v každém uzlu jeden stupeň volnosti, tj. teplotu. Osmiuzlový prvek je vhodný k modelování zakřivených oblastí a je použitelný pro 2-D úlohy pro přechodné termické analýzy. Materiálové vlastnosti byly zvoleny z tabulek 9,10,11,12 (Kap. 7.2.4). Okrajové podmínky byly určeny stejně jako v předchozí podkapitole 7.2 (analytické řešení). Níže jsou zobrazeny geometrie detailů (A, B, C, D) včetně vytvořených konečnoprvkových sítí použitých pro teplotní simulace a dále teplotní pole vycházející ze tří zatěžovacích stavů.

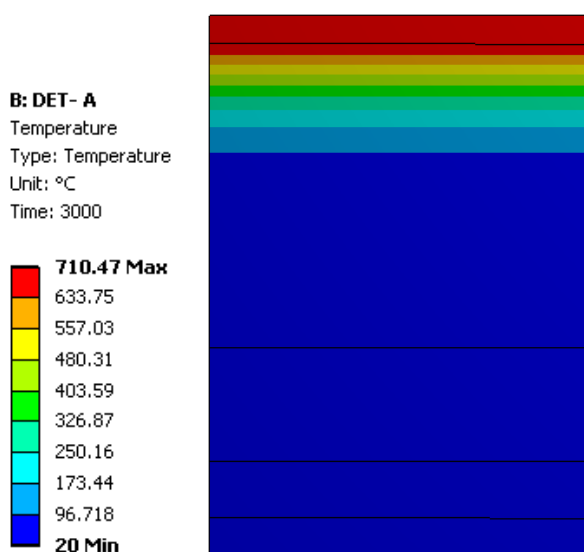
DETAIL A



Obrázek 31: Geometrie skladby obvodové stěny Steico (nadpraží) včetně konečnoprvkové sítě [34]

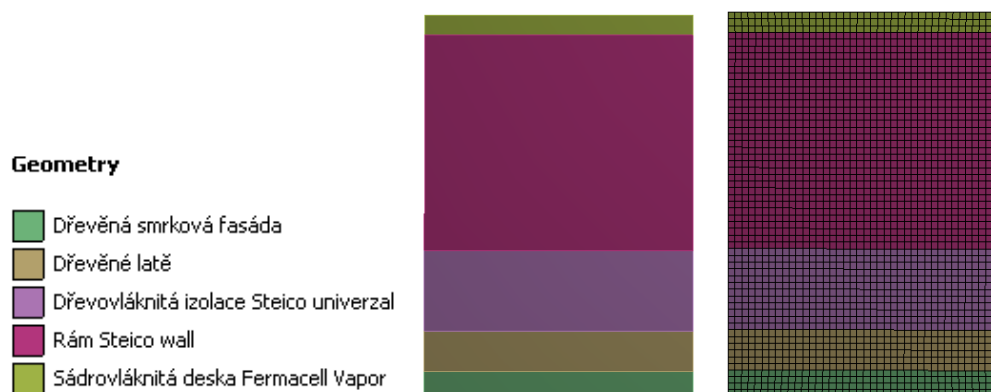


Obrázek 32: Normová teplota (vlevo) a parametrická teplota (vpravo) – teplotní pole v čase 50 min (3000 s) [34]

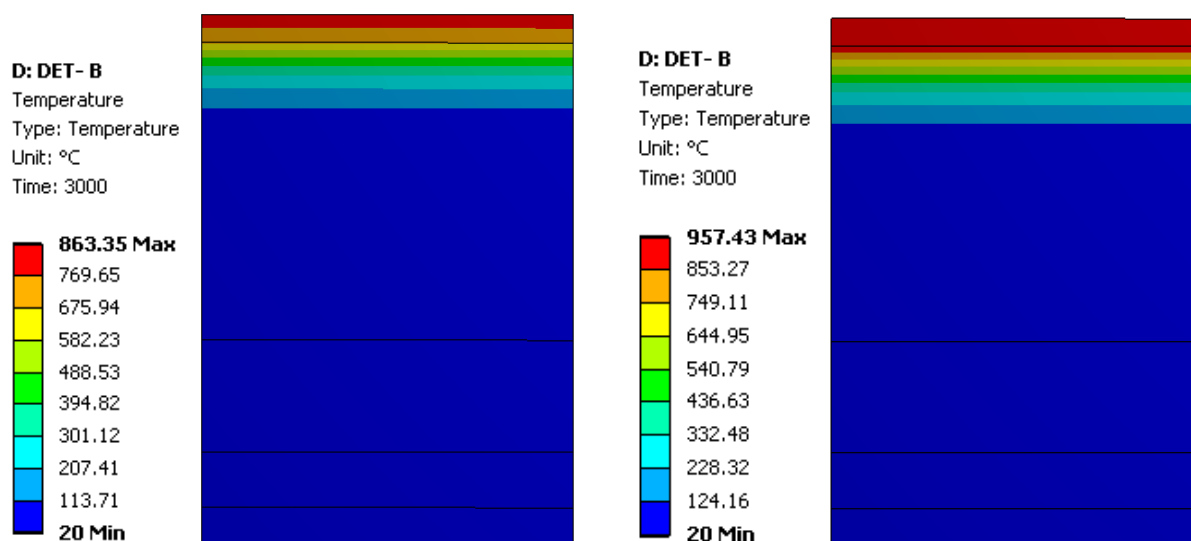


Obrázek 33: Třetí zatěžovací stav (předem naměřené teploty) – teplotní pole v čase 50 min (3000 s) [34]

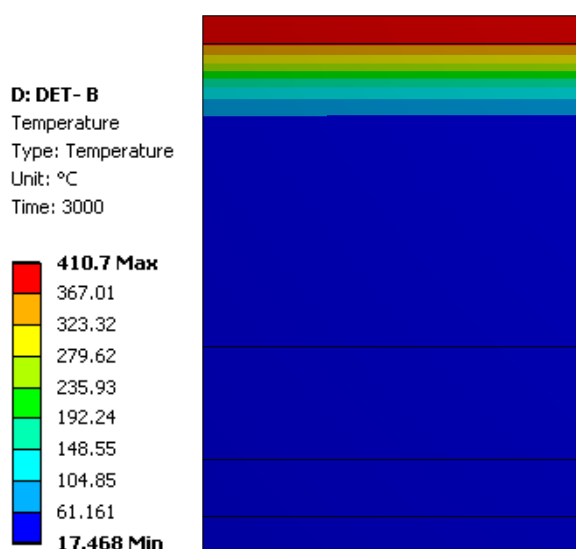
DETAIL B



Obrázek 34: Geometrie skladby obvodové stěny Steico včetně konečnoprvkové sítě [34]

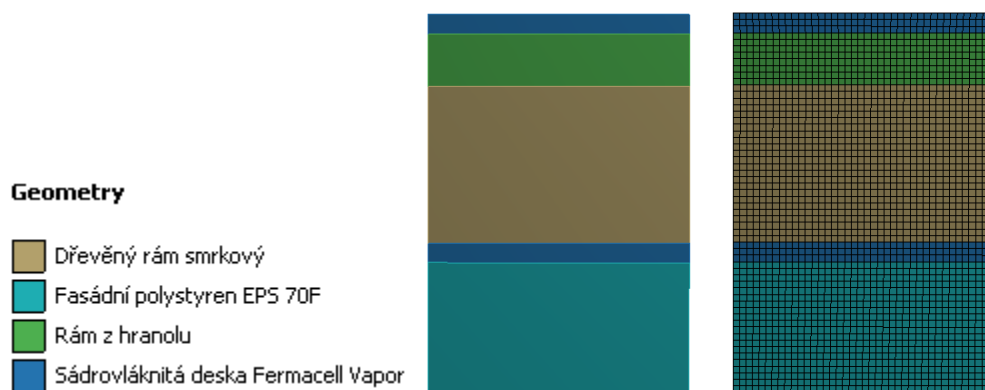


Obrázek 35: Normová teplota (vlevo) a parametrická teplota (vpravo) – teplotní pole v čase 50 min [34]

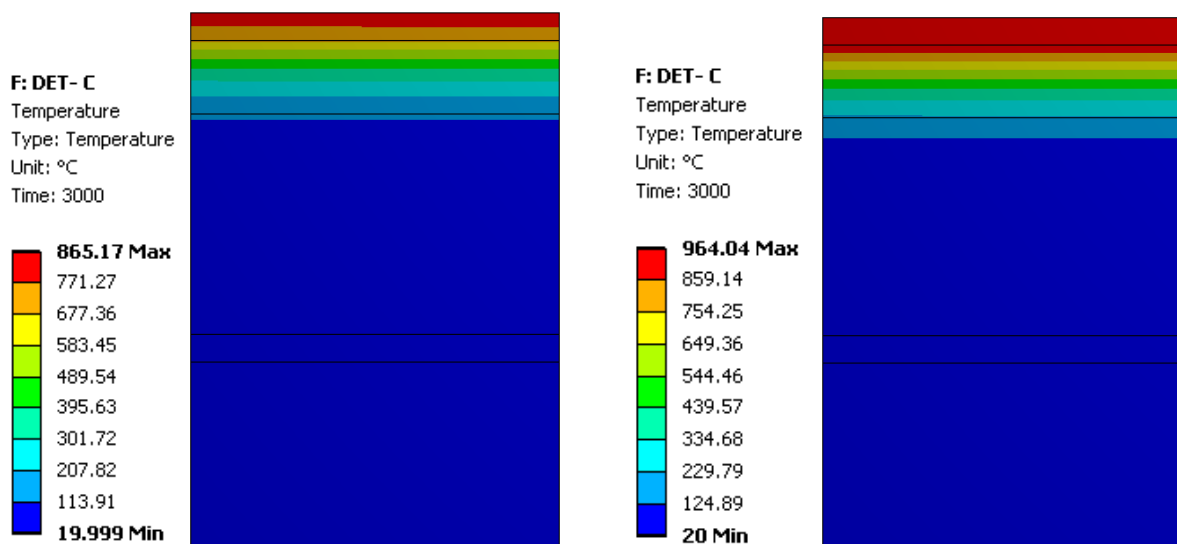


Obrázek 36: Třetí zatěžovací stav (předem naměřené teploty) – teplotní pole v čase 50 min (3000 s) [34]

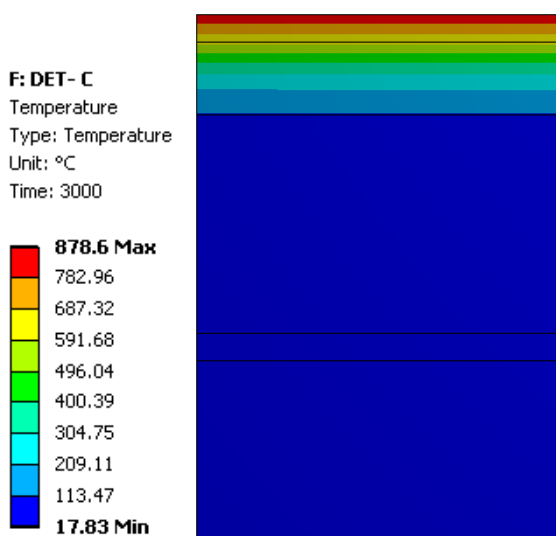
DETAIL C



Obrázek 37: Geometrie skladby obvodové stěny systému RD Rýmařov, s.r.o. včetně konečnoprvkové sítě [34]

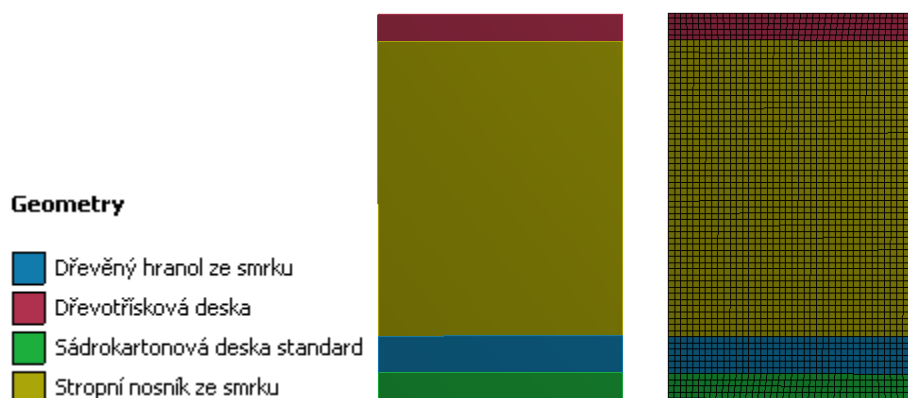


Obrázek 38: Normová teplota (vlevo) a parametrická teplota (vpravo) – teplotní pole v čase 50 min [34]

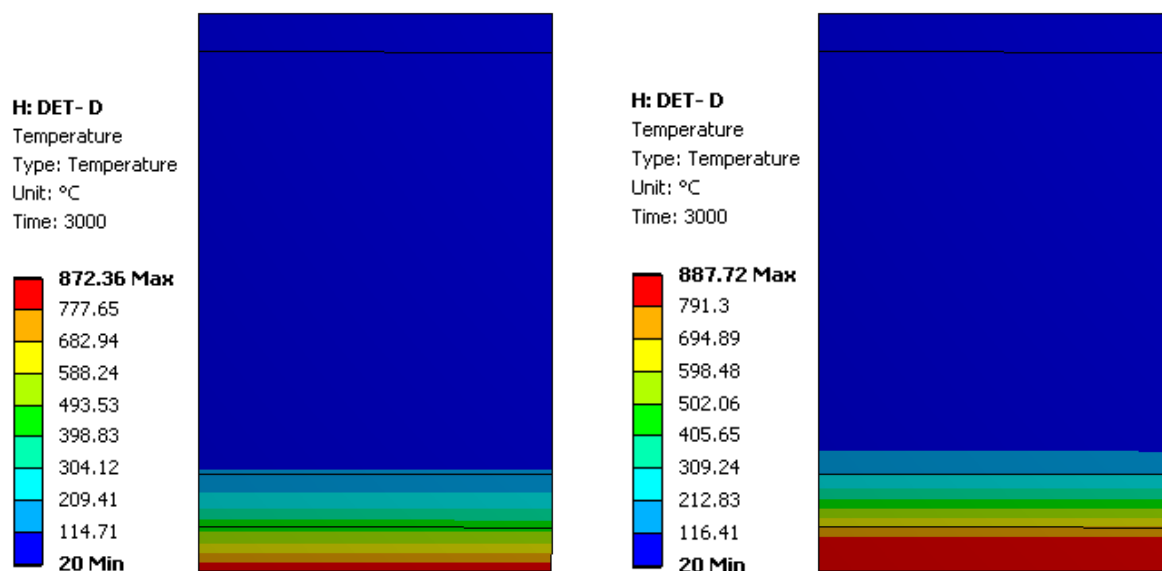


Obrázek 39: Třetí zatěžovací stav (předem naměřené teploty) – teplotní pole v čase 50 min (3000 s) [34]

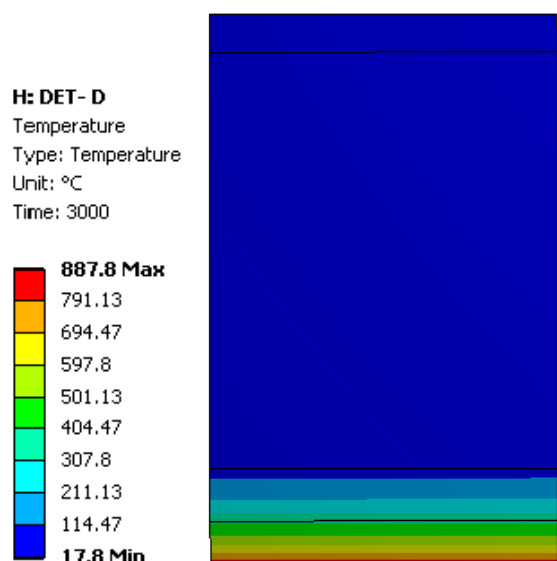
DETAIL D



Obrázek 40: Geometrie skladby stropu včetně konečnoprvkové sítě [34]



Obrázek 41: Normová teplota (vlevo) a parametrická teplota (vpravo) – teplotní pole v čase 50 min [34]

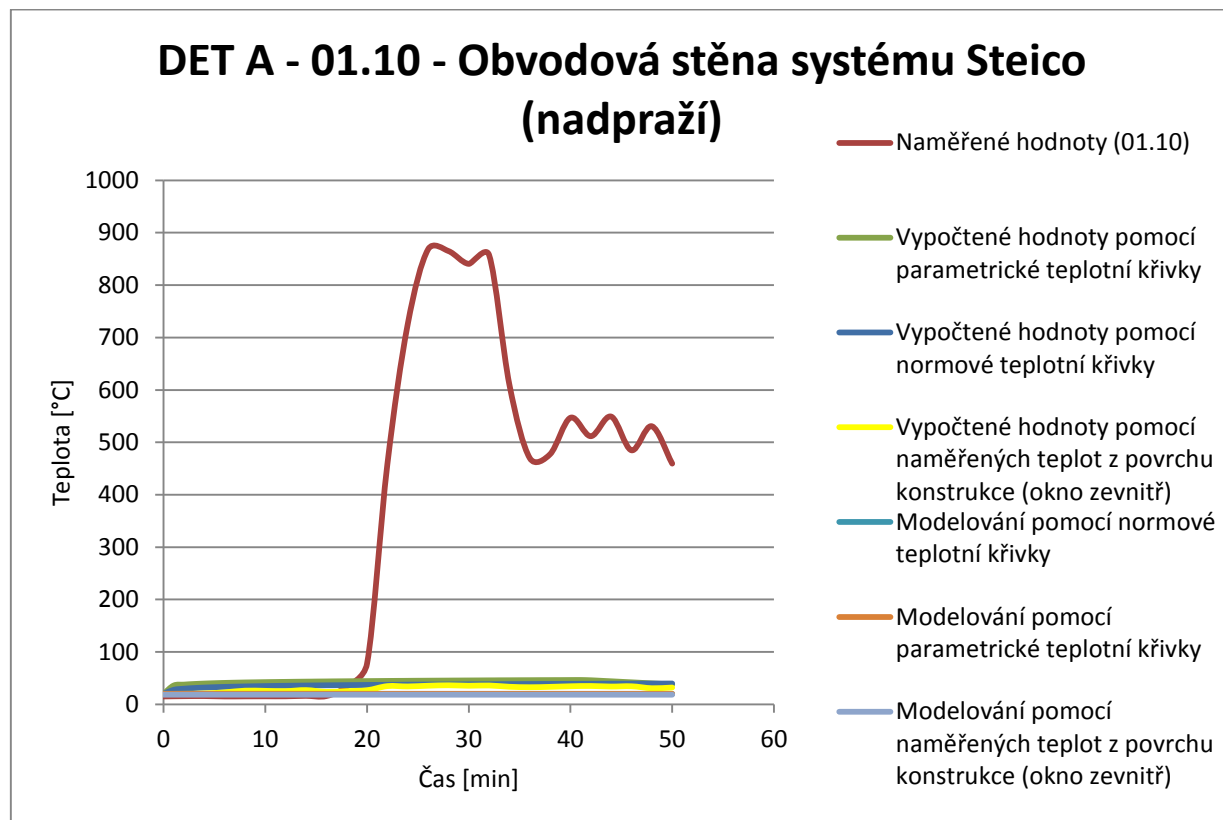


Obrázek 42: Třetí zatěžovací stav (předem naměřené teploty) – teplotní pole v čase 50 min (3000 s) [34]

7.4 Porovnání naměřených hodnot s výstupy z modelování a výpočtů dle analytického řešení

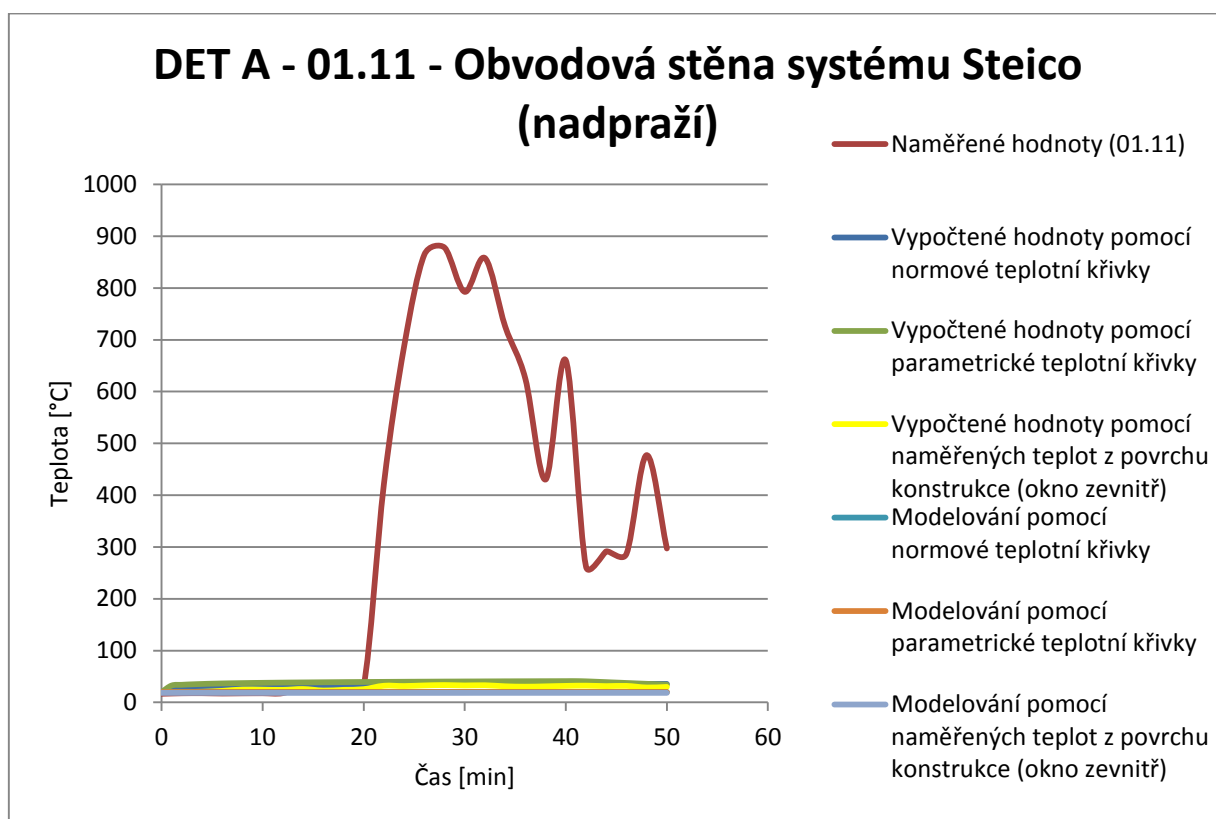
Detaily A, B, C, D označující řezy obvodových konstrukcí s umístěním termočlánků na rozhraní vrstev se nachází v kapitole 7.1.2 (umístění termočlánků).

Detail A (01.10, 01.11)



Graf 4: Det A – 01.10: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.

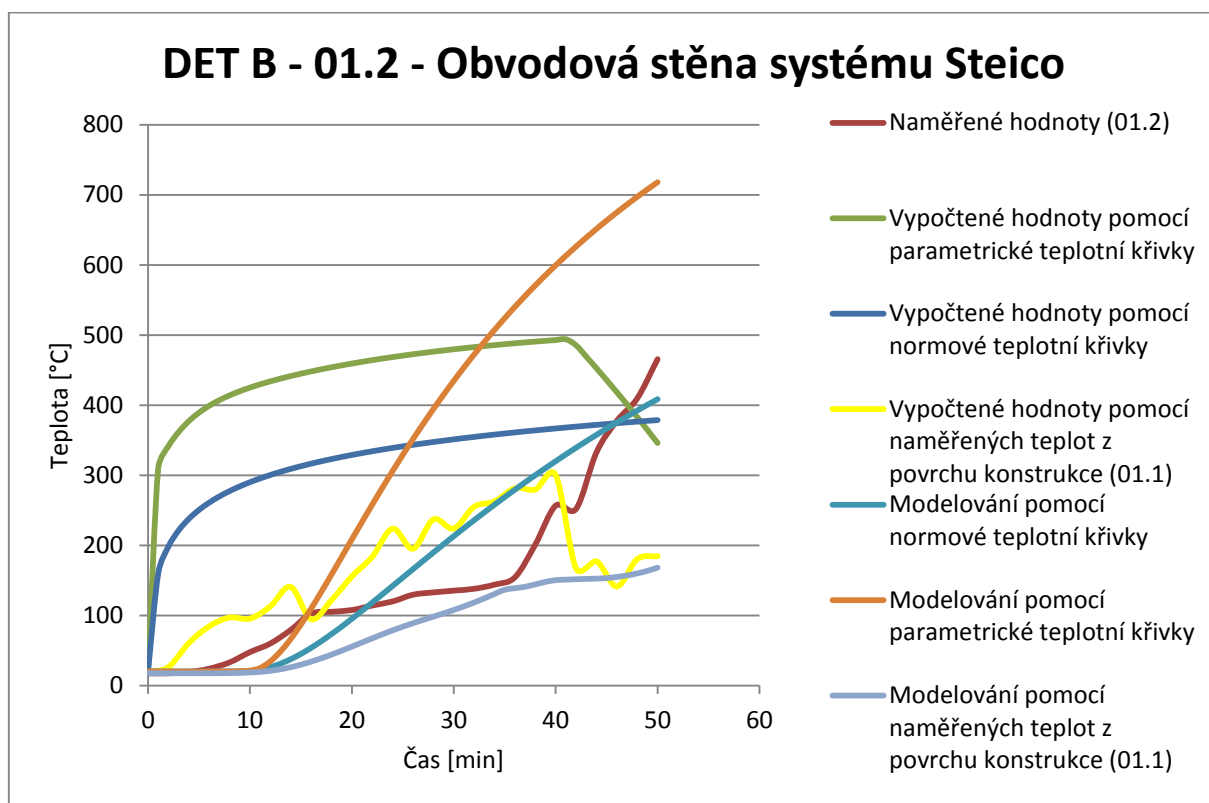
Ve 12. minutě požární zkoušky došlo k prasknutí okenní tabule v místnosti kuchyně. Nad okenní tabulí se nacházely umístěné termočlánky a byl tudíž veden výpočet a modelování přestupu tepla. Aby se zachoval směr toku zplodin hoření, byla použita dřevěná zástěna, kterou hasiči opět uzavřeli okenní otvor. Ovšem od 20. minuty začalo docházet k prohořívání krycí zástěny. Plameny začaly pronikat otvorem a obtékat obvodovou stěnu z vnější strany, čímž začaly rychle narůstat teploty v konstrukci. Tento okamžik znázorňuje náhle rostoucí křivka v grafu 4 a 5 představující naměřené hodnoty. Jelikož ani ve výpočtech ani v modelování nebyla uvažována okenní tabule, kvůli které docházelo k působení požáru také z vnější strany obvodové stěny, ostatní křivky představující vypočtené a vymodelované průběhy teplot tak zůstávají konstantní a kopírují naměřené hodnoty právě do 20. minuty.



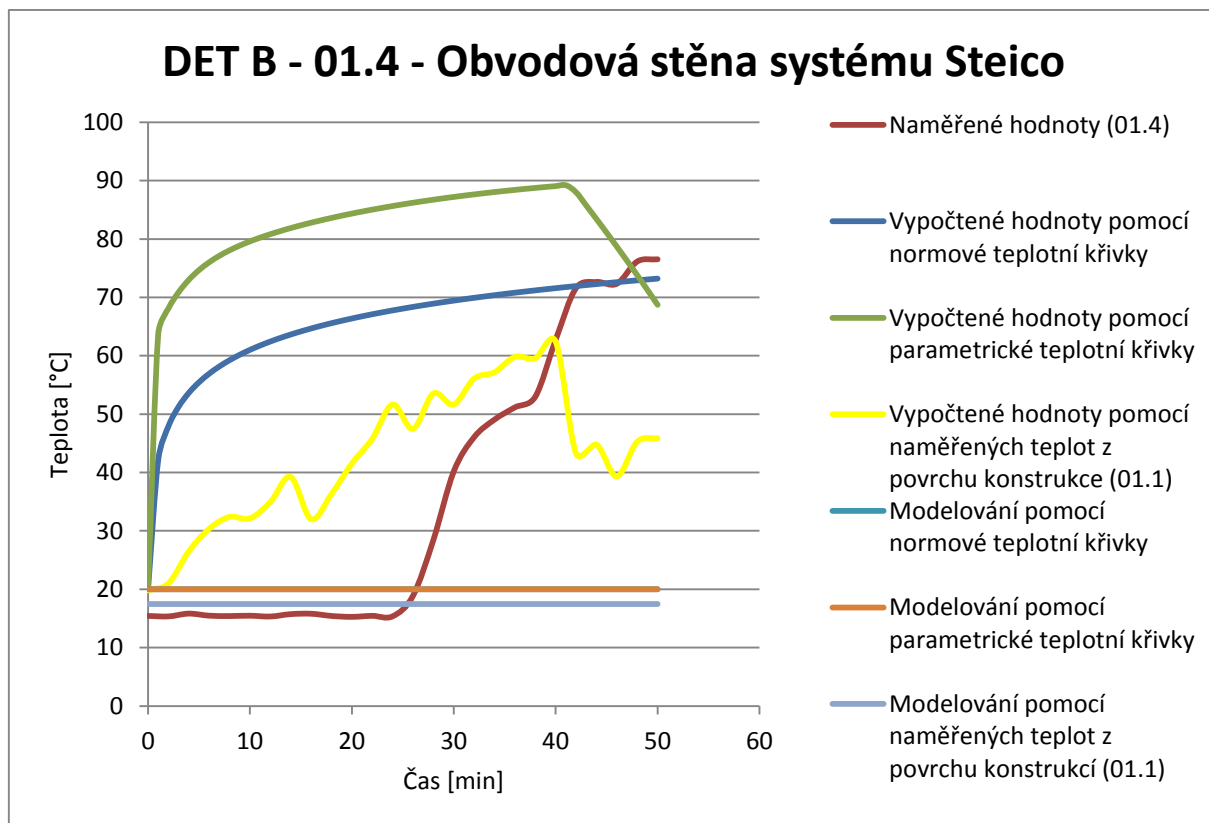
Graf 5: Det A – 01.11: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.

V grafu 5 je znázorněn obdobný průběh teplot jako v předchozím grafu 4, jelikož se zde jedná o teploty vypočtené, vymodelované a naměřené ve stejném detailu průřezu obvodovou stěnou na rozhraní stěn o vrstvu bližší vnější straně než v předchozím případě. Při srovnání průběhu naměřených teplot z grafu 5 a grafu 4 je vidět, že v některých minutách jsou naměřené teploty z grafu 5 vyšší než naměřené teploty z grafu 4. To potvrzuje, že docházelo k působení požáru také na vnější stranu obvodové stěny.

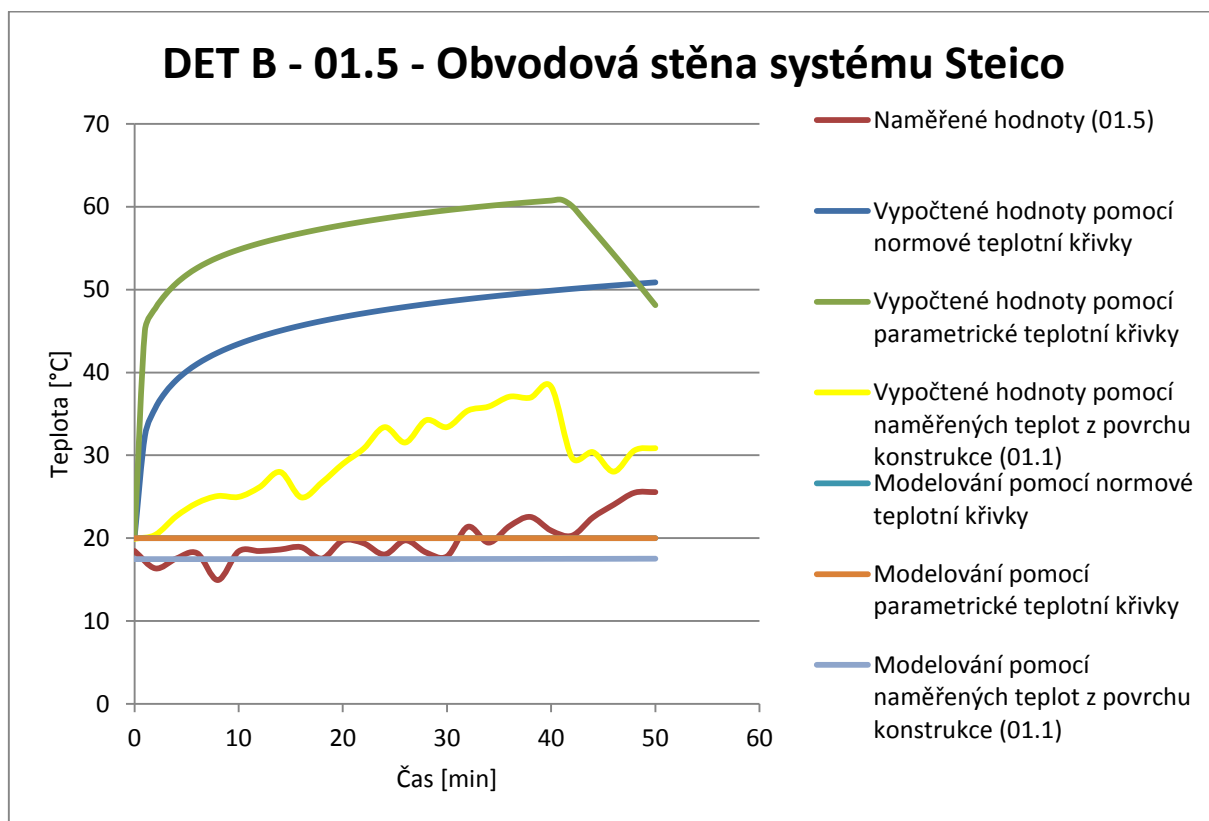
Detail B (01.2, 01.4, 01.5)



Graf 6: Det B – 01.2: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.



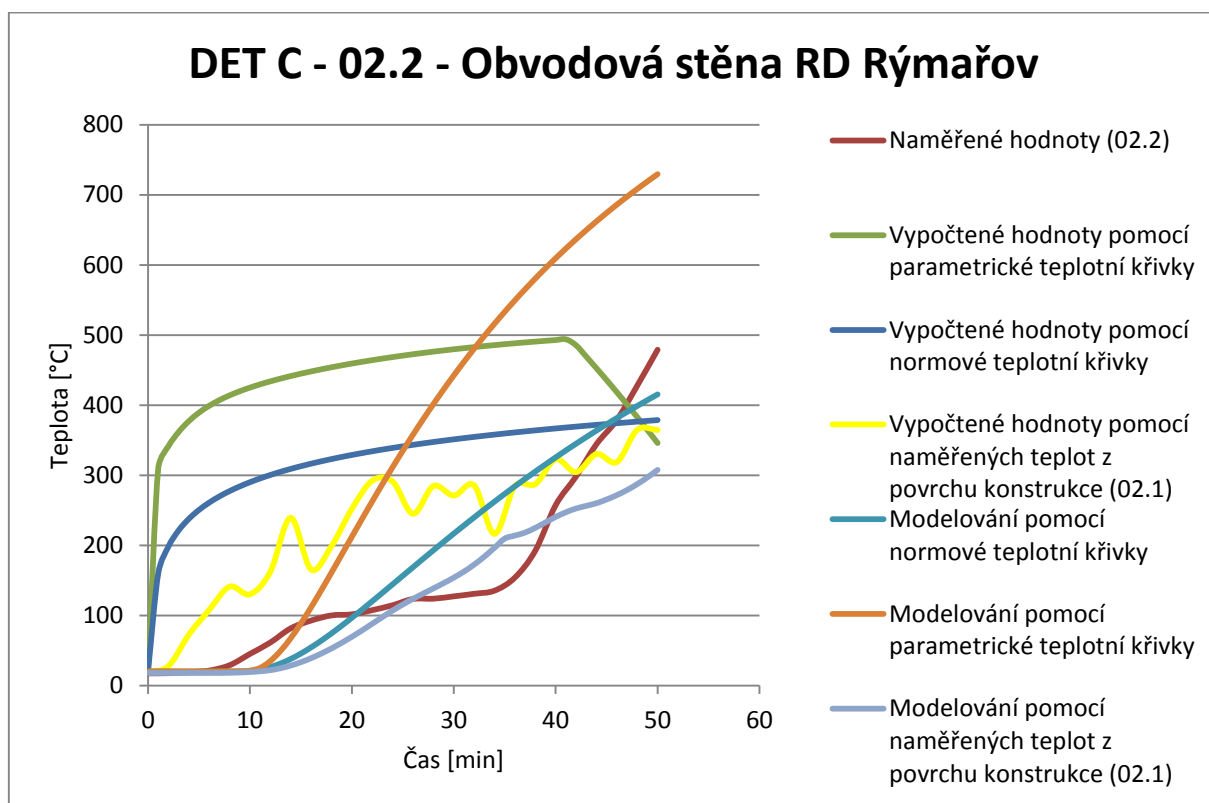
Graf 7: Det B – 01.4: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.



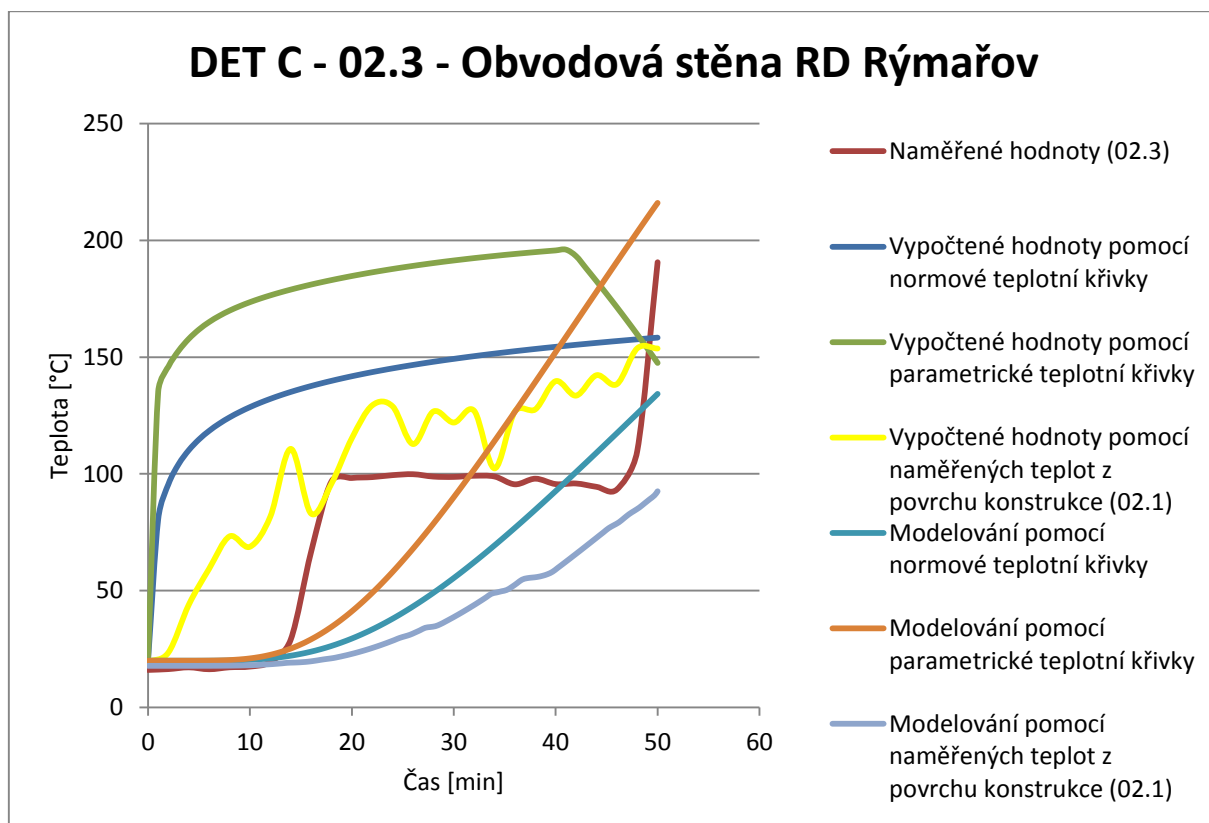
Graf 8: Det B – 01.5: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.

V grafech 6 a 8 se částečně téměř všechny křivky blíží ke křivce představující naměřené teploty, přičemž nejvíce se k ní přibližuje křivka představující modelování pomocí normové teplotní křivky. Z křivek vzniklých pomocí výpočtů je pak nejbližší křivka představující vypočtené hodnoty pomocí naměřených teplot z povrchu konstrukce. V grafu 7 se křivce představující naměřené teploty do 25. minuty nejvíce blíží všechny vymodelované křivky (pomocí všech tří zatěžovacích stavů). Ovšem po 25. minutě začne křivka představující naměřené teploty náhle růst, zatímco vymodelované křivky zůstávají konstantní.

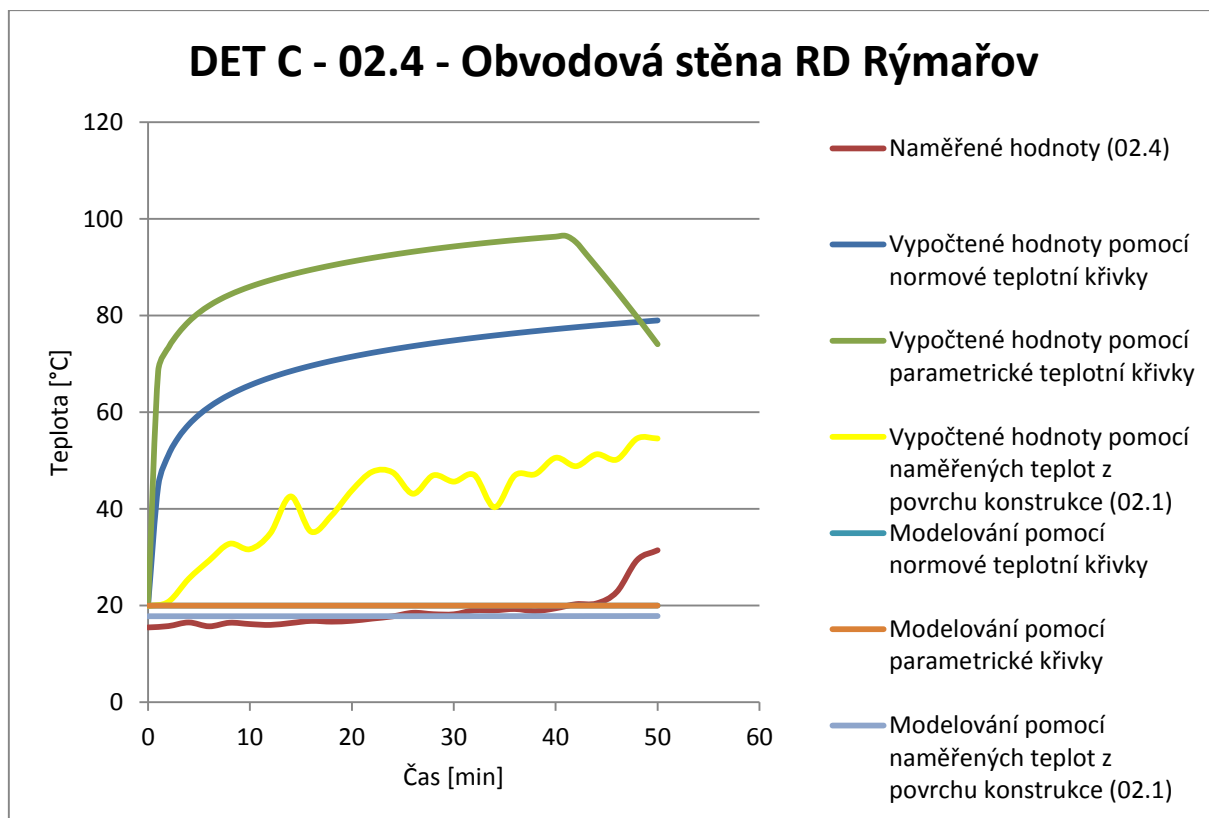
Detail C (02.2, 02.3, 02.4)



Graf 9: Det C – 02.2: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.



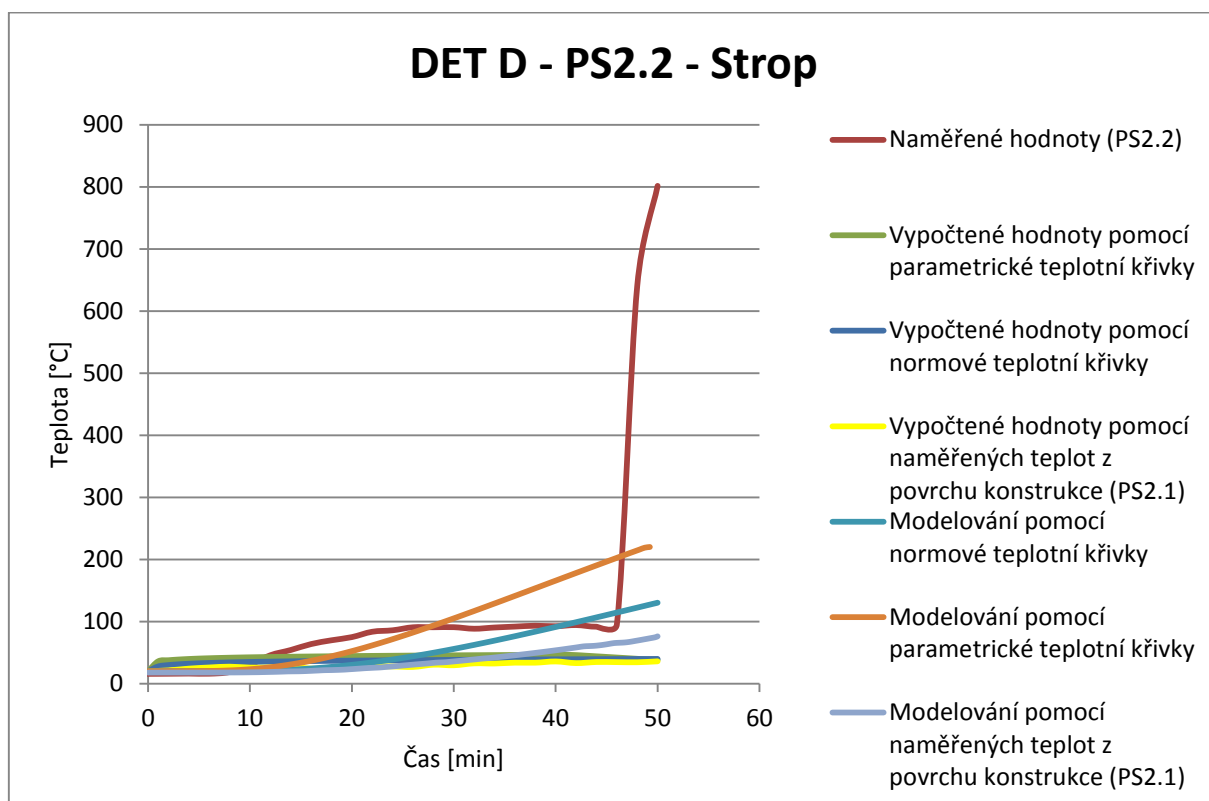
Graf 10: Det C – 02.3: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.



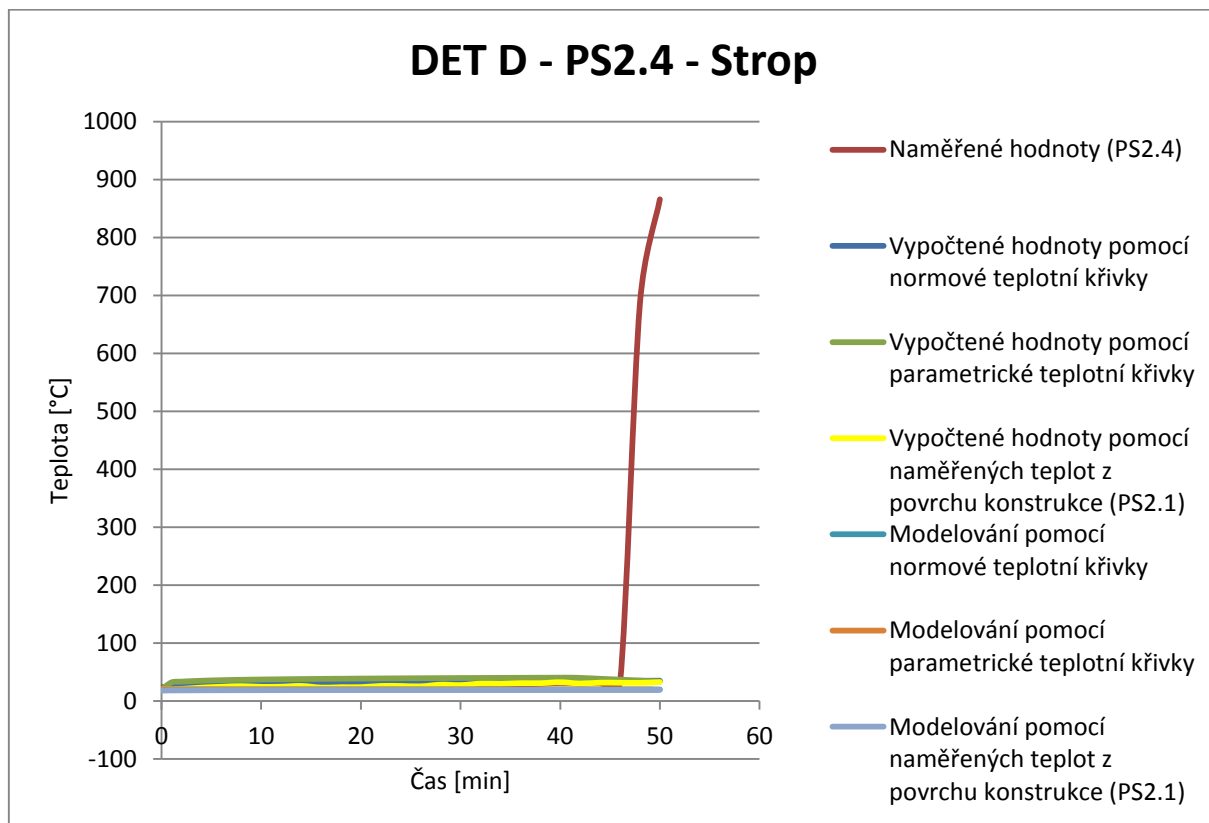
Graf 11: Det C – 02.4: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.

Z detailu C v grafech 9, 10, 11 se všechny křivky téměř blíží ke křivce představující naměřené teploty, přičemž nejvíce se k ní přibližuje křivka představující modelování pomocí normové teplotní křivky. Z křivek vzniklých pomocí výpočtů je pak nejbližší křivka představující vypočtené hodnoty pomocí naměřených teplot z povrchu konstrukce.

Detail D (PS2.2, PS2.4)



Graf 12: Det D – PS2.2: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.



Graf 13: Det D – PS2.4: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.

Z detailu D označující řez stropu jsou všechny křivky z grafu 12 obdobné, jako křivky z grafu 13. Ovšem v grafu 12 všechny křivky od cca 20. minuty nepatrně stoupají a v konstrukci stropu tak rostou teploty. To vyústí ve 46. minutě, kdy křivka představující naměřené teploty výrazně stoupne. V tento čas zřejmě došlo ke zhroucení, nebo prohoření části stropní konstrukce a termočlánky tak byly plně vystaveny požáru. Do té doby (46. minuty) ovšem všechny křivky téměř kopírují křivku představující naměřené hodnoty.

8 Závěr

Dřevo je obnovitelná recyklovatelná surovina s dobrými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, s relativně vysokou požární odolností a s životností pro běžné stavby zcela dostačující. Dřevo sice lze zapálit, může podporovat oheň a dále ho šířit, ovšem jeho chování při požáru je částečně předvídatelné a šíření plamene lze omezit povrchovými úpravami nebo impregnací.

Jedním z problémů je legislativa omezující využití dřevěných konstrukcí na vícepodlažní budovy. Požární bezpečnost dřevostaveb je dána evropskými normami, ale dovolená výška zůstává stále národní odpovědností. Zatímco v České republice je povolená požární výška 12 m, ve Švédsku, Finsku, Norsku nebo Dánsku je bez omezení.

Největším problémem u hořlavého konstrukčního systému konstrukce DP3 jsou velké odstupové vzdálenosti, které při ploše obvodové stěny průměrného baráku činí něco málo přes 10 m. Problém spočívá v souvislosti s umístováním dřevostaveb na pozemek, neboť v požárně nebezpečném prostoru se nemohou nacházet žádné jiné objekty, ani jiný požární úsek téhož objektu (mimo výjimky viz kapitola 6.4). Když bychom například chtěli vedle stávající dřevostavby postavit nový objekt, musíme brát ohledy na velký požárně nebezpečný prostor dřevostavby se skladbou obvodové stěny konstrukce DP3 a dodržet dostatečnou vzdálenost objektů, což je ve stísněných prostorách mnohdy velkým problémem a někdy i neřešitelné.

V experimentální části bylo k výpočtům a modelování přestupu tepla konstrukcí zapotřebí vypočítat vstupní teploty plynu v požárním úseku. Pro tento případ byla zvolena normová a parametrická teplotní křivka a obě byly následně porovnány s teploty plynu uvnitř požárního úseku. U parametrické teplotní křivky lze přesně definovat veškeré charakteristiky požárního úseku, uvažuje fázi chladnutí, a tudíž by měla být tedy mnohem přesnější oproti nominálním teplotním křivkám, které nepotřebují žádné vstupní parametry a neuvažují fázi chladnutí. Avšak v příkladu určeném v této diplomové práci tomu tak není. Zatímco normová teplotní křivka téměř přesně kopíruje průběh předem naměřených teplot plynu v prostoru. Vrchol parametrické křivky je ve 40. minutě o cca 400 °C výše nad ostatními teplotními křivky. To může být způsobeno tím, že otvor po rozbití byl uzavřen a tím se mohly změnit poměry odvětrávání.

Hlavním cílem diplomové práce bylo provést řešení přestupu tepla konstrukcí dřevostavby z velkorozměrové zkoušky pomocí modelování v programu Ansys, dle analytického řešení a porovnat je se skutečnými naměřenými hodnoty. Pro výpočty a

modelování bylo potřeba nejprve určit všechny okrajové podmínky (viz kapitola 7.2). K výpočtům byla k této diplomové práci vytvořena funkce v programu Microsoft Excel, která vedla k zjednodušení a urychlení výpočtů. Pro modelování byl použit nelineární, multifyzikální program Ansys mechanical.

V kapitole 7.4 Porovnání naměřených hodnot s výstupy z modelování a výpočtů dle analytického řešení byly pomocí grafů porovnávány průběhy teplot na rozhraní vrstev konstrukce vypočtené (pomocí normové teplotní křivky, parametrické teplotní křivky, naměřených teplot z povrchu konstrukce), modelované (pomocí normové teplotní křivky, parametrické teplotní křivky, naměřených teplot z povrchu konstrukce) s naměřenými teplotami pomocí termočlánků. Ve všech grafech se všechny křivky téměř blíží ke křivce představující naměřené teploty. Výjimkou byly grafy z detailu A, kde křivka představující naměřené teploty po 20. minutě rázně stoupá, neboť plameny požáru začaly pronikat otvorem okna a obtékat obvodovou stěnu z vnější strany, čímž začaly rychle narůstat teploty v konstrukci. Další výjimkou byly grafy z detailu D, kde křivka představující naměřené teploty po 46. minutě rázně stoupá, neboť v tento čas zřejmě došlo k zhroucení, nebo prohoření části stropní konstrukce a termočlánky tak byly plně vystaveny požáru.

Přesnějším řešením pro zjištění průběhů teplot na rozhraní vrstev bylo modelování v programu Ansys, přičemž nejpřesnější bylo modelování pomocí normové teplotní křivky. Z vypočtených hodnot byl nejpřesnější výpočet pomocí naměřených teplot z povrchů konstrukcí. Modelování je přesnější, neboť s jeho pomocí lze oproti výpočtům přesněji definovat materiálové vlastnosti a další okrajové podmínky konstrukce.

Jelikož je rozvoj požáru závislý na mnoha okolnostech (energie iniciačního zdroje, množství paliva, umístění ohniska, počasí,...) nelze úplně přesně určit jeho průběh a tedy ani průběh teplot v čase. Ovšem je třeba říct, že se všechny křivky určené jak výpočty, tak modelováním uspokojivě shodují s naměřenými teplotami. A pokud se lehce odlišují, pak směrem k bezpečné straně (vypočtené a vymodelované teploty jsou vyšší než ve skutečnosti). Dle obou řešení tedy lze s určitou mírou spolehlivosti charakterizovat přestup tepla konstrukcí a určit tak její požární odolnost, dobu, po kterou jsou schopny nosné a požární dělicí konstrukce odolávat účinkům požáru bez porušení požadované funkce.

Citovaná literatura

- [1] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce, skriptum 2005*. 1.vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 9/2005. 15,08 AA, 17,35 VA. ISBN 80-01-03310-4.
- [2] HUMLÁK. *Stavba dřeva*. [online]. 2012. [cit. 20.4.2013]. <drevvari.humlak.cz/data_web/data_skola/HUdrevva/2.pdf>
- [3] ČSN – EN – 1991 – 1 – 1 – Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení
- [4] REICHL, Jaroslav. *Klíč k fyzice aneb příběhy ze života (pro střední školy)*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Albatros, 2005, 220 stran, ISBN: 80-001590-0
- [5] SEDLIAKOVÁ, Michala. *Stavebnictví. Výhody a nevýhody dřevostaveb*. [online]. 28.02.2010, [cit. 20.4.2013] <<http://www.asbportal.cz/stavebnictvi/drevostavby/vyhody-a-nevyhody-drevostaveb-972.html>>
- [6] WALD, František a kol. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. 1.vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2005. 26,94 AA, 27,83 VA. ISBN 80-01-03157-8.
- [7] ČSN – EN – 1995 – 1 – 2 EUROKÓD 5 – Navrhování dřevěných konstrukcí na účinky požáru
- [8] YOUNGQUIST, John A. *Wood-based composites and panel products*. [online]. 1999. [cit. 22.4.2013]. < <http://www.wbpionline.com/features/wood-specialist-adds-panel-line>>
- [9] BENÁK, Jaroslav. Dřevo portál. *Dřevostavby a zemětřesení*. [online]. 2.5.2011. [23.4.2013]. < <http://www.drevoportal.cz/clanky/clanky-z-externich-zdroju/drevostavby-a-zemetreseni>>
- [10] MULLER, Stanislav. Dřevo portál. *Požární bezpečnost vícepodlažních budov*. [online]. 31.8.2010. [24.4.2013]. < <http://www.drevoportal.cz/clanky/clanky-redakce-drevoportalu/pozarni-bezpecnost-vicepodlaznich-budov>>
- [11] ČSN 73 0802 – PBS – Nevýrobní objekty (2009/05 + Z1 2013/02)
- [12] ČSN EN 13501 (730860) – Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb
- [13] ČSN 73 0821ed.2 – PBS – Požární odolnost stavebních konstrukcí (2007/05)
- [14] ZOUFAL, Roman. a kolektiv. *Hodnoty PO stavebních konstrukcí podle Eurokódu*. PAVUS a.s. Praha, 2009. 128 s. ISBN 978-80-904481-0-0
- [15] POKORNÝ, Marek. *PBS - Syllabus pro praktickou výuku*. Verze 01_2010.12
- [16] HEJDUK Pavel., KUKLÍK Petr. *Požární bezpečnost nízkopodlažních obytných budov ze dřeva*. [online]. 2004. [25.4.2013].

- <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/02_Konstrukce%20a%20pozemni%20stavby/2_02_Konstrukce%20kovove%20a%20drevene/Hejduk_Pavel.pdf>
- [17] DUFKOVÁ, Magdaléna. TZB Info. *Požární odolnost vícepodlažních budov na bázi dřeva*. [online]. 4.7.2011. [26.4.2013]. <<http://stavba.tzb-info.cz/vlastnosti-drevostaveb/7618-pozarni-odolnost-vicepodlaznich-budov-na-bazi-dreva>>
- [18] KUKLÍK, Petr. *Moderní dřevostavba – její chování za požáru – evropské znalosti a předpisy*. [online]. 10.5.2012 Bratislava. [27.4.2013]. <<http://www.prolignum.cz>>
- [19] ÖSTMAN, Birgit. National fire regulations limit the use of wood in buildings. SE-114 86 Stockholm. [28.4.2013].
- [20] Östman, B.: *Fire safe timber buildings – a Nordic Wood project*, Swedish Institute for Wood Technology Research. Stockholm, 2002. [28.4.2013]. <www.tratek.se>
- [21] PŘEČEK, L. *Podpora pro navrhování vícepodlažních dřevostaveb*. [online]. 9.7.2008, ČVUT v Praze. [29.4.2013].
<<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Vicepodlazni-drevostavby-I-Uvod-do-problematiky.html>>
- [22] ČSN 73 0810 – PBS – Společná ustanovení (2009/04)
- [23] AGROP NOVA a.s. *Technická dokumentace systému Novatop* [online]. 2013. [9.5.2013]. <www.novatop-system.cz>
- [24] POKORNÝ, Marek. *Výpočet odstupové vzdálenosti z hlediska sálání tepla*. FRVŠ 2010. [online]. <https://kps.fsv.cvut.cz/index.php?lmut=cz&part=people&id=46>
- [25] FAKULTA BEZPEČNOSTNÍHO INŽENÝRSTVÍ VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA [online]. 2014. <http://www.fbi.vsb.cz/cs/o-fakulte/historie-soucastnost-vize/stalo-se/velkorozmerova-zkouska-rymarov/>
- [26] ČESELSKÁ Tereza, FILIPI Bohdan, BRADÁČOVÁ Isabela, KUČERA Petr, MYNARZ Miroslav. *Zpráva o výsledcích požární zkoušky dřevostavby v Rýmařově dne 24. 4. 2014*. [Červen 2014].
- [27] Data z drátových termočlánků typu K s průměrem drátu 0,5mm přenesené do měřicí ústředny ALMEMO.
- [28] SOKOL, Zdeněk. *Teplotní analýza v ČSN EN 1991-1-2 (přednáška)*. 2011.
- [29] ČSN – EN – 1991 – 1 – 2 – Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru (2004)
- [30] ČUPR Pavel. *Metoda konečných prvků pro úlohy přenosu tepla* [online]. 2013.
- [31] BALOG Karol, KVARČÁK Miloš. *Dynamika požáru*. . Edice SPBI spektrum, 1999. 117 s. ISBN 80-86111-44-X

- [32] Bc. FOJTÍK, A. *Validace velkorozměrové zkoušky požáru dřevostavby prostřednictvím matematického modelování*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2015. 42 s.
- [33] DROZDA J., HASNÍKOVÁ H., JIRSÁK V., MAŠOVÁ E. *Průručka ANSYS Workbench*. Vydalo Česká technika – nakladatelství ČVUT, Thákurova 1, 160 41, 1.vydání. ISBN 978-80-01-05175-7.
- [34] Program Ansys mechanical APDL product launcher včetně nápovědy programu Ansys.
- [35] SCHEIDL, M. *Požární řešení administrativní budovy KRNAP v Horním Maršově. Část E – Možnosti využití hořlavého konstrukčního systému*. Bakalářská práce. Praha: ČVUT, Fakulta stavebního inženýrství, obor požární bezpečnost staveb, 2013.

Seznam obrázků

Obrázek č. 8: Směry zkoušení vlastností dřeva [2]	5
Obrázek č. 9: Kanadský srubový dům [2]	9
Obrázek č. 10: Dřevěný suk [1]	10
Obrázek č. 11: Lávka v Essingu [1]	11
Obrázek č. 12: Změna dřeva v průřezu konstrukčního prvku při požáru [6]	12
Obrázek č. 13: Zbytkový a účinný průřez [6]	14
Obrázek č. 14: moderní vícepodlažní dřevostavba [8]	15
Obrázek č. 8: Vícevrstvé konstrukce druhu: A) DP2; B) DP3 [15]	16
Obrázek č. 9: Druhy konstrukčních systémů z požárního hlediska [15]	17
Obrázek č. 10: Požární výška objektu h v ČR a SR [15]	18
Obrázek č. 11: Potencionální zájem trhu o vícepodlažní budovy ze dřeva [18]	20
Obrázek č. 12: Příklady skladeb obvodových konstrukcí [23]	24
Obrázek č. 13: Umístění zkušebního objektu	28
Obrázek č. 14: Zkušební objekt	29
Obrázek č. 15: Dispozice zkušebního objektu	30
Obrázek č. 16: Detail skladby nadpraží okna včetně umístění termočlánků [26]	31
Obrázek č. 17: Detail skladby stěny systému Steico včetně umístění termočlánků [26]	31
Obrázek č. 18: Detail skladby stěny systému RD Rýmařov, s.r.o. [26]	32
Obrázek č. 19: Detail skladby stropu včetně umístění termočlánků [26]	32
Obrázek č. 20: Rozmístění termočlánků pro měření teplot na stropní konstrukci [26]	33
Obrázek č. 21: Rozmístění termočlánků pro měření teplot [26]	33
Obrázek č. 22: Rozmístění termočlánků pro měření teplot [26]	33
Obrázek č. 23: Vyskládané hraničky a polička s prostředky denní potřeby	34
Obrázek č. 24: Schéma rozmístění nábytku a hraniček v obytné místnosti [26]	34
Obrázek č. 25: Zapálení vaničky s technickým lihem [26]	36
Obrázek č. 26: Rozhořívání zkušebního objektu	36
Obrázek č. 27: Rozhořívání zkušebního objektu	36
Obrázek č. 28: Plně rozvinutý požár modelu dřevostavby	37
Obrázek č. 29: Dohašení požáru jednotkou HZS	37
Obrázek č. 30: Půdorys zkušebního objektu [26]	40
Obrázek č. 31: DET A - Geometrie včetně konečnoprvkové sítě [34]	48

Obrázek č. 32: DET A - Normová a parametrická teplota – teplotní pole v čase [34]	48
Obrázek č. 33: DET A - Třetí zatěžovací stav – teplotní pole v čase [34].....	48
Obrázek č. 34: DET B - Geometrie včetně konečnoprvkové sítě [34]	49
Obrázek č. 35: DET B - Normová a parametrická teplota – teplotní pole v čase [34]	49
Obrázek č. 36: DET B - Třetí zatěžovací stav – teplotní pole v čase [34].....	49
Obrázek č. 37: DET C - Geometrie včetně konečnoprvkové sítě [34]	50
Obrázek č. 38: DET C - Normová a parametrická teplota – teplotní pole v čase [34]	50
Obrázek č. 39: DET C - Třetí zatěžovací stav – teplotní pole v čase [34].....	50
Obrázek č. 40: DET D - Geometrie včetně konečnoprvkové sítě [34]	51
Obrázek č. 41: DET D - Normová a parametrická teplota – teplotní pole v čase [34]	51
Obrázek č. 42: DET D - Třetí zatěžovací stav – teplotní pole v čase [34].....	51

Seznam tabulek

Tabulka č. 2: Umístění ČR v Evropě [1].....	8
Tabulka č. 2: Počet podlaží povolených podle předpisů v severských zemích [20].....	19
Tabulka č. 3: Kritéria vlastností	22
Tabulka č. 4: Vyhodnocení požadavků ČSN na obvodové konstrukce	23
Tabulka č. 5: Průběh teplot v konstrukci z detailu A a detailu B závislé na čase [27]	38
Tabulka č. 6: Průběh teplot v konstrukci z detailu C a detailu D závislé na čase [27]	39
Tabulka č. 7: Požární zatížení a celková hmotnost zařizovacích předmětů [26]	42
Tabulka č. 8: Výchřevnosti materiálů vyskytujících se ve zkušebním objektu [26]	42
Tabulka č. 9: Skladba konstrukce detailu A.....	44
Tabulka č. 10: Skladba konstrukce detailu B.....	44
Tabulka č. 11: Skladba konstrukce detailu C.....	44
Tabulka č. 12: Skladba konstrukce detailu D.....	45

Seznam grafů

Graf č. 1: Odstupové vzdálenosti v závislosti na ploše stěny	25
Graf č. 2: Odstupové vzdálenosti v závislosti na ploše okna	26
Graf č. 3: Srovnání teplotních křivek s naměřenými teplotami na povrchu kcí a v prostoru ..	43

Graf č. 4: DET A – 01.10: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot	52
Graf č. 5: DET A – 01.11: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot	53
Graf č. 6: DET B – 01.2: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.....	54
Graf č. 7: DET B – 01.4: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.....	54
Graf č. 8: DET B – 01.5: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.....	55
Graf č. 9: DET C – 02.2: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.....	56
Graf č. 10: DET C – 02.3: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.....	56
Graf č. 11: DET C – 02.4: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.....	57
Graf č. 12: DET D – PS2.2: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.....	58
Graf č. 13: DET D – PS2.4: Vypočtené, vymodelované a naměřené průběhy teplot.....	58